



Universidad de Pinar del Río
Facultad de Ciencias Técnicas
Dpto. de Telecomunicaciones y Electrónica

Trabajo de diploma.

Título: Diseño de una turbina hidrocínética tipo Savonius.

Autor: Irati Zubialde García

Pinar del Río. 2016



Universidad de Pinar del Río
Facultad de Ciencias Técnicas
Dpto. de Telecomunicaciones y Electrónica

Trabajo de diploma.

Título: Diseño de una turbina hidrocínética tipo Savonius.

Autor: Irati Zubialde García

Tutor: MSc. Ing. Omar Fuentes Lorenzo

Pinar del Río, 2016

PENSAMIENTO

Lo que importa verdaderamente en la vida no son los objetivos que nos marcamos, sino los caminos que seguimos para lograrlo.

(Peter Bamm)

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on the right side, suggesting it's resting on a surface.

Presidente del Tribunal

Secretario

Vocal

Ciudad y fecha:

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autora de este Trabajo de Diploma y que autorizo ala Universidad de Pinar del Río, a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



Irati Zubialde García

Irati Zubialde García autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Irati Zubialde García autoriza al Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica adscrito a la Universidad de Pinar del Río a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia CreativeCommons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <http://telecom.upr.edu.cu/Textuales/Tesis>

Irati Zubialde García autoriza al Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica adscrito a la Universidad de pinar del Río a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia CreativeCommons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de tesinas disponible en: <http://revistas.mes.edu.cu>

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo quiero agradecer a todos los familiares y amigos que confiaron en mí, principalmente a mis padres, María Jesús García y Juan Isidro Zubialde, a mi hermana Itziar y a mi novio Iñaki Zugasti por estar siempre ahí y apoyarme en estos años de estudio.

Agradezco al Programa de Formación Solidaria entre la Universidad Pública de Navarra y la Universidad de Pinar del Río por brindarme la oportunidad de realizar el presente trabajo a través de este programa.

A toda la gente Cubana, que me ha ayudado y apoyado a realizar este trabajo durante mi estancia en Cuba, especialmente a mi tutor Ing. Omar Fuentes.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado:

- A todos mis familiares, especialmente a mis abuelos.
- A mi compañera de viaje Marta y Tania y Alfonso por acogernos en su casa durante la estancia en Cuba y darnos todo su apoyo y cariño.

RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología empleada para el diseño de un rotor de tipo Savonius para ser utilizado como generador hidrocínético en un canal de agua artificial de la provincia de Pinar del Río. Se parte de realizar un análisis de los antecedentes y el estado actual de este tipo de sistemas, las distintas variantes existentes, así como las potencialidades en la localidad municipal y se detalla el diseño propuesto, los cálculos realizados y la selección de los materiales. También se muestra los análisis estructurales y de fuerza hechos mediante simulación, utilizando el software SolidWork 2014.

SUMMARY

This paper describes the methodology used for the design of a rotor of Savonius type to be used as hydrokinetic generator in an artificial water channel in the province of *Pinar del Rio* is described. It is based on an analysis of the background and current status of this type of system, the existing variants and the potential in the municipal town and the proposed design, calculations and selection of materials detailing. It also shows strength and structural analyses made through simulation, using software SolidWork 2014.

TABLA DE CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I: La generación de energía mediante hidrocínética.....	17
1.1 Energía hidrocínética.....	17
1.2.1 Tipos de energía hidrocínética.....	20
1.2.1.1 Generación de electricidad por corrientes marítimas.....	20
1.2.1.2 Generación de energía por ríos.....	23
1.2.2 Turbinas hidrocínéticas.....	25
1.2.2.1 Turbinas de eje horizontal.....	26
1.2.2.2 Turbinas de flujo cruzado.....	27
1.2.2.3 Turbinas de eje vertical.....	27
1.2.2.4 Turbinas de eje horizontal y vertical.....	28
1.2.3 El uso del canal de aumento.....	32
CAPÍTULO II: MATERIALES Y METODOS.....	35
2.1 Diseño de la turbina tipo Savonius.....	35
2.2 Datos hidráulicos de la provincia de Pinar del Río.....	36
2.3 Aspectos teóricos.....	37
2.3.1. Potencia cinética de un fluido.....	37
2.3.2 Ley de Betz.....	38
2.3.3 Fuerza de sustentación.....	42
2.3.4 Fuerza de arrastre.....	42
2.4 Parámetros a tener en cuenta para el diseño de la turbina.....	43
2.4.1 Condiciones externas.....	43
2.4.2 Condiciones internas.....	44

2.5 Cálculo y diseño.....	50
2.5.1 Diseño de los diferentes elementos de la turbina.....	50
2.5.2 Cálculo del diámetro del rotor.....	56
2.5.3 Cálculo del espesor de las palas.....	57
2.5.4 Determinación del espesor del eje.....	61
2.5.5 Longitud de las correas.....	66
2.5.6 Volante de inercia.....	66
2.5.7 Esfuerzo axial en la estructura.....	67
2.5.8 Tecnología de soldadura.....	68
2.5.9 Análisis y selección de rodamientos.....	69
2.5.10 Diseño de las chavetas.....	72
2.6 Mantenimiento.....	73
2.6.1 Mantenimiento preventivo.....	73
2.6.2 Mantenimiento correctivo.....	74
2.6.3 Mantenimiento predictivo.....	74
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	75
3.1 Valoración del diseño.....	75
3.2 Impacto económico del resultado.....	75
3.2 Impacto ambiental.....	78
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS.....	88

INTRODUCCIÓN

La energía siempre ha sido un recurso imprescindible en el desarrollo de la humanidad. El ser humano durante siglos utilizaba las fuentes energéticas como el viento para la navegación a vela o el fuego para calentar y cocer alimentos. En un principio fueron las fuentes de energía que hoy llamamos renovables las que más se utilizaban, la aparición de molinos de viento o como los molinos de agua, las cuales se asentaban como las primeras bases de la energía hidráulica...(ríos, viento, sol, mareas, etc.). Con la aparición de la revolución industrial y el desarrollo de la ciencia (1820-1840), estas fuentes de energía naturales fueron desplazadas por las basadas llamadas energía convencional, soportadas en recursos fósiles (carbón, petróleo, gas) y las mejoras aplicadas como pueden ser las centrales térmicas y nucleares. Pero estos recursos además de los daños que producen al medio ambiente, al cambio climático, a los altos riesgos de contaminación ante fenómenos naturales o accidentes, la disminución de los recursos necesarios y los vaivenes del mercado que conllevan a precios inestables, se ha creado una inquietud social.

Debido a la concientización social por el devenir del planeta para mejorar las condiciones ambientales-sociales que se han causado, el ser humano se ha dado cuenta lo fundamental del modelo de desarrollo y funcionamiento. Esta concientización viene por fecha por los años 80-90, destacando el movimiento del desarrollo sostenible que se realizó oficial en el año 1992 de la cumbre de Río de Janeiro. Posteriormente se ha ido desarrollando un concepto de “desarrollo sostenible” que al igual que “Objetivos de Desarrollo del Milenio” tienen la intención principal de asegurar el desarrollo actual de la sociedad sin condicionar (o destruir) las posibilidades de desarrollo de generaciones futuras.

Por todo esto, la sociedad urgentemente se ha visto en busca de otra alternativa de generación de energía, las cuales estén basadas en recursos inagotables y que perjudiquen lo mínimo posible al medio ambiente. Buscando en su origen y retomando las fuentes originales de energía es que surgen las llamadas energías no convencionales, o también llamadas energías renovables, a las que todavía no se explota totalmente todo su potencial.

Dentro de estas fuentes de energía la hídrica ha destacado desde un principio por ser un recurso al alcance de la gran mayoría del planeta. Históricamente, la mayor parte de las poblaciones en el mundo tienen un río en su proximidad, ya que este aporta agua dulce, alimentos y transporte. Sin embargo el aprovechamiento de esta energía se basó en la creación de represas y embalses, lo que requiere de grandes inversiones, no siempre con el suficiente aporte energético y además con un daño colateral al entorno donde se desarrolla la obra civil, lo que en ocasiones provoca la clausura de proyectos.

En cuanto a la energía hidráulica, hoy en día se ha venido desarrollando un nuevo tipo de obtención de energía, denominada hidrocínética, esta se basa en aprovechar la velocidad que lleva el agua (tanto en el mar como en los ríos) para poder generar electricidad. A pesar de su reciente aparición ya está ganando una gran aceptación en el mundo debido a sus beneficios.

La importancia de la energía, denominada hidrocínética es cada vez más creciente, referida por diferentes autores [1], [2], [3] entre otros, los cuales apuntan a la sostenibilidad ecológica desde el impacto ambiental en la naturaleza y la sociedad, condicionado a su vez inversiones económicas de menor cuantía. Sin embargo, hoy en día, todavía no es habitual hacer uso de la energía hidrocínética que poseen las corrientes de agua, para una mayor generación de electricidad.

Es por esto que la situación descrita anteriormente ha permitido determinar como **problema científico** de la investigación: ¿Cómo aprovechar la energía existente en los canales de agua de la provincia Pinar del Río para la generación eléctrica?

En consecuencia se reconoce como **objeto de investigación**: el aprovechamiento de la energía existente en los canales de agua de la provincia Pinar del Río.

Para dar solución al problema, transformando el objeto, se define como **objetivo**: diseñar un sistema de generación eléctrica que permita aprovechar la energía existente en los canales de agua de la provincia de Pinar del Río.

Para dar respuesta al problema general y lograr el objetivo propuesto, se desglosó en los siguientes **objetivos específicos**:

- Determinar los antecedentes del desarrollo de las fuentes de energía renovables con énfasis en la hidrocínética.
- Determinar el estado actual de las fuentes de energía hidrocínética y el posible aprovechamiento de esta en los canales de agua de la provincia Pinar del Río.
- Realizar el análisis matemático y diseño teórico de un posible generador hidrocínético que permita el aprovechamiento de la energía existente en los canales de agua de la provincia Pinar del Río.
- Realizar las simulaciones de comportamiento, estructuras y planos del generador hidrocínético diseñado.

Para alcanzar los objetivos trazados y organizar las tareas de la investigación, se define el siguiente cronograma:

#	Tareas	Fecha
1	Estudio teórico de las diferentes fuentes de energías renovables con énfasis en la energía hidrocínética. Antecedentes y desarrollo de esta.	Oct 2015-Dic 2015
2	Estudio del basamento teórico de la energía hidrocínética y su posible aprovechamiento en la provincia de Pinar del Río.	Nov 2015-Dic 2015
3	Diseño teórico de la propuesta de generador hidrocínético acorde a las condiciones de trabajo seleccionadas.	Dic 2015-Feb 2016
4	Evaluación del diseño y la factibilidad del mismo mediante modelos simulados, haciendo análisis de carga, resistencia, fuerzas, etc.	Ene 2016-Feb 2016

Hipótesis

Si se realizan los cálculos y se diseña un generador hidrocínético que permita aprovechar la energía existente en los canales de agua de la provincia Pinar del Río se podrá ampliar la generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía.

Como **métodos de investigación** se utilizan los siguientes:

Método histórico: teniendo en cuenta el conocimiento previo ya construido acerca del tema y las tendencias existentes, se podrá analizar la posibilidad de utilización de la energía hidrocínética adaptándolo a nuestra realidad.

Método de modelación: para realizar procesos de abstracción y estudiar el objeto como sistema y en sus partes. Esta modelación o simulación se realizará a través del software de simulación SolidWork.

Método sistémico: para lograr el diseño es necesario conocer el funcionamiento de cada uno de sus componentes por separado.

Método de análisis y síntesis: conociendo de manera independiente cada uno de los elementos teóricos necesarios para la investigación, se combinarán para lograr el diseño de la aplicación.

Para una mejor comprensión y una lectura coherente del documento, el mismo se ha dividido en tres capítulos.

El capítulo 1 aborda los antecedentes históricos hasta la actualidad y los elementos teóricos correspondientes al objeto de estudio de esta investigación, específicamente, la generación hidrocínética y su clasificación.

El capítulo 2 muestra una descripción detallada del diseño, partiendo de los fundamentos teóricos hasta la simulación y la propuesta final, además de las principales características de los dispositivos usados.

El capítulo 3 presenta el análisis económico del proyecto de investigación.

CAPÍTULO I: LA GENERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE HIDROKINÉTICA. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

En el presente capítulo, se presenta un análisis de los antecedentes de la generación de electricidad a partir de la generación de energía hidrocínética, como expresión de energía renovable. Así mismo, se precisan las características de las turbinas como generadoras de electricidad en correspondencia con el objetivo de esta investigación.

1.1 Energía hidrocínética

Para realizar un análisis en torno a la energía hidrocínética resulta oportuno referir qué se está entendiendo por energía y en particular la renovable.

En correspondencia, se asume que la energía renovable es aquella que se obtienen de fuentes naturales o también llamadas fuentes inagotables. Esto se debe a que la cantidad de energía es ilimitada, como son el Sol, viento, agua... o por el recurso de regenerarse de manera natural, como son las mareas, forestales... Hoy en día son siete las principales fuentes de energía renovables que existen: energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energías marinas, energía maremotriz, energía geotérmica y bioenergía.

Considerando que la energía es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo, es decir, los materiales están asociados con una cantidad de energía la cual se cede o se recibe a otros cuerpos. Existen cantidad de formas diferentes para transmitirla. Por ejemplo, la energía mecánica, se debe a la capacidad que tiene los cuerpos con masa para efectuar un trabajo, esto se debe a la suma de energías potenciales y cinéticas.

Tomando como punto de partida los elementos antes aludidos, se precisa, que la energía hidrocínética es expresión de energía renovable perteneciente al campo de las hidroeléctricas.

Los procesos de conversión de energía hidrocínética se basan en la utilización de la energía cinética que posee el agua en movimiento, ya sean ríos, canales de agua, corrientes marinas y otros cursos de aguas artificiales que ha creado el hombre para producir energía eléctrica, la agricultura o el consumo humano. Este tipo de energía renovable, aunque se enmarca dentro de las hidroeléctricas, no se caracteriza como una obtención de energía habitual, ya

que cuando se habla de energía hidroeléctrica, normalmente se refieren a las centrales donde el caudal de agua es artificial, es decir, el agua se almacena en presas o embalses naturales o artificiales (creadas por el hombre) en el cual se va regulando el suministro del agua a las turbinas mediante compuertas, y así poder generar la energía necesaria en cada momento. En cambio, los convertidores hidrocínicos se construyen sin alterar el caudal del agua, aprovechando la corriente del agua. *Radkey y Hibbis* lo describen como “un convertidor de energía electromecánica que aprovecha la energía cinética del agua de río.” [1]

Hasta hoy han sido desarrollados una serie de conceptos para la utilización de la energía de las corrientes de agua, siendo consideradas las turbinas hidrocínicas como la mejor opción para dicha conversión [4]. Tomando como referencia a las turbinas desarrolladas para aplicaciones eólicas pero en este caso siendo sumergidas en el agua, las turbinas hidrocínicas constan de los mismos elementos constructivos básicos: un rotor, una caja de velocidades, un generador y un sistema de conversión AC/DC – DC/AC [5], [2].

El término aquí utilizado de “turbinas hidrocínicas” también se puede encontrar en la literatura de otras formas como: turbinas de corrientes de agua (WCT) [6], turbina hidráulicas de cabeza ultra baja, [1], turbinas hidráulicas en la corriente [3], turbinas de corrientes de ríos (RCT) o sistemas de conversión de energía de corrientes de río (RCECS), [4], [7]. En este trabajo se ha adoptado “turbinas hidrocínicas” el cual va a permitir abarcar un aspecto más amplio, todas las turbinas usadas para la conversión de dicho tipo de energía, ya sean aquellas basadas en las corrientes marinas, corrientes de los ríos, o canales de aguas naturales y artificiales.

A diferencia de los sistemas hidroeléctricos ya conocidos, donde es imprescindible la construcción de presas, las turbinas hidrocínicas no requieren nada o casi nada de obra civil, en el caso de su utilización en un canal, ya dicha obra existe de por sí. Esta es la causa por lo que su instalación causaría un impacto ambiental casi nulo, además de que también puede significar una inversión económica mucho menor.

Los sistemas de conversión de energía a través de la hidrocínica son muy similares a las tecnologías de conversión utilizados por la energía eólica. Los

principios fundamentales utilizados en el diseño de sistemas basados en la energía eólica; la sección de las palas, el límite de Betz han sido aplicadas en las turbinas hidrocinéticas para su posterior desarrollo. Sin embargo, a diferencia de los aerogeneradores, y producto de la influencia que tiene la densidad del fluido, en este caso es el agua, una turbina hidrocinética puede trabajar con una velocidad inferior a la del viento, aproximadamente de 2,3 m/s y producir cuatro veces más energía que una turbina similar eólica, además de que sus dimensiones pueden ser menores[6], [8]. Esto es debido a las diferencia de densidades que tienen los dos fluidos, teniendo el agua una densidad de 1000 Kg/m^3 y el viento $1,223 \text{ kg/m}^3$. Esta es la razón por la cual, mientras las turbinas de viento generalmente, están diseñadas para trabajar en velocidades que se encuentran entre 11 y 13 m/s, las turbinas hidrocinéticas se diseñan para velocidades de entre 0.8 y 3 m/s [9].

En la siguiente gráfica se puede observar la diferencia entre la potencia suministrada para una turbina eólica y una turbina hidráulica. (Figura 1.)

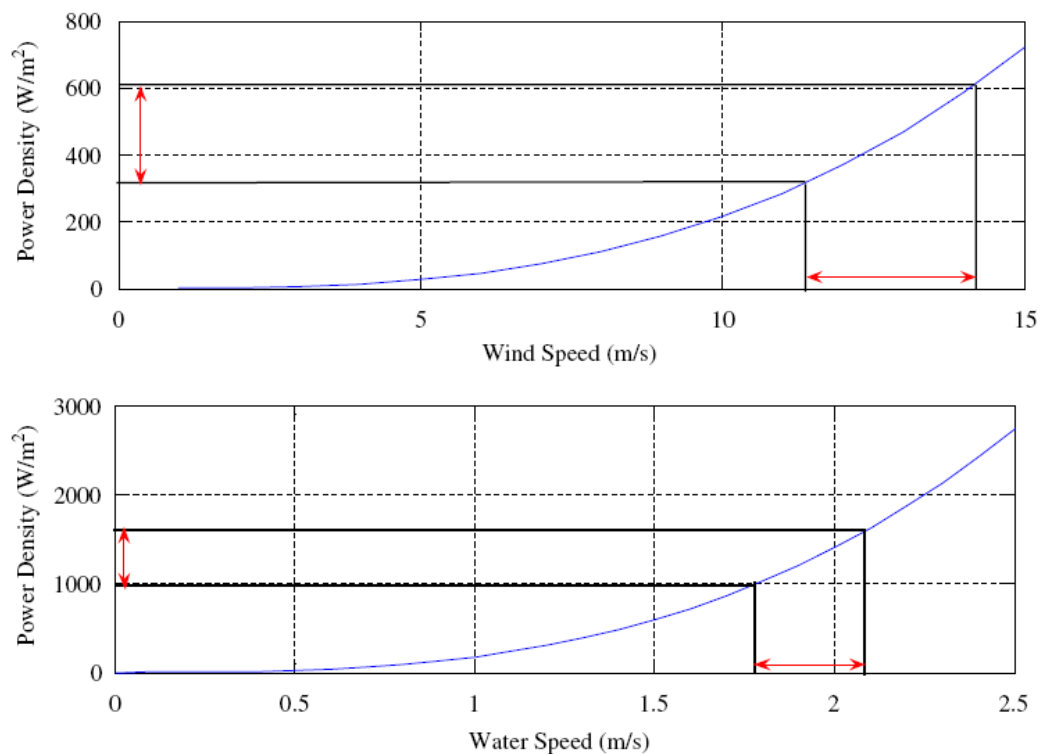


Figura 1. Potencia entre la densidad del fluido para una turbina eólica y una de agua. ($C_p=0.35$) Fuente: [8]

Existen dos áreas principales donde los generadores hidrocinéticos pueden ser usados y de las cuales existen varios antecedentes de utilización de esta

tecnología, estos son tanto en corrientes de mareas como en ríos [9], [4], [10], [11].

1.2.1 Tipos de energía hidrocinética

Actualmente la energía hidrocinética es más común en las instalaciones de aguas dulces, como son ríos o canales que en instalaciones en el mar. Aunque nuevamente se están desarrollando sistemas de obtención de electricidad aprovechando la energía de las corrientes marítimas.

1.2.1.1 Generación de electricidad por corrientes marítimas

El movimiento del agua de los océanos hace que se produzca un ascenso y descenso periódico del nivel de esta, este fenómeno es conocido como marea. Este movimiento es debido a la fuerza de atracción gravitatoria que ejerce fundamentalmente la Luna sobre la tierra. Dicha variación del nivel del mar a causa de las mareas produce el desplazamiento horizontal y periódico de grandes masas de agua denominadas corrientes de mareas. Estas corrientes son particularmente evidentes en estrechos, canales o estuarios, la cual presenta las ventajas de ser abundante, regular y predecible [12], [13].

La primera estación de generación de energía a partir de las mareas se abrió en Francia en 1966, denominada “*La Rance*”, (Figuras 2 y 3) por estar ubicada en la desembocadura del río Rance. Posee un total de 24 generadores para una potencia instalada de 240 MW y un promedio de generación de 64 MW [14].

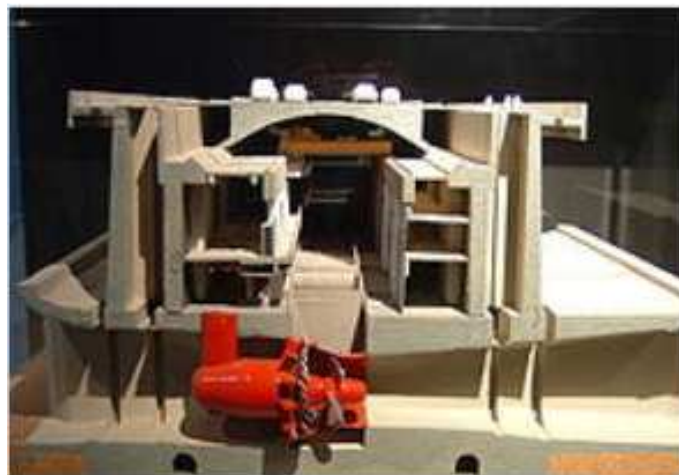


Figura 2. Modelo de la turbina utilizada en La Rance. Fuente:[14]



Figura 3. Vista de la planta generadora de La Rance. Fuente [14].

Posteriormente se han ejecutado varios proyectos de generación como el *Sihwa Lake TidalPowerStation*, la cual es actualmente la planta generadora más grande del mundo, con 254 MW de potencia destronando a *La Rance* en el año 2011. Ubicada en Korea del Sur, se creó originalmente con propósitos agrícolas y para atenuar daños por inundaciones, se encuentra equipada con 10 unidades de 25.4 MW.

Durante el año 2000 se ejecutó el proyecto *EnemareI* que poseía una turbina de eje vertical de tipo Darrieus con 6 m de diámetro llamada *Kobold*, (Figura 4). Esta turbina logró alcanzar una potencia de 50 kW en una corriente de 2,4 m/s. [15].

En el 2003 se ejecutó otro proyecto en el canal de Bristol, llamado *Seaflow*, el rotor de eje horizontal con 11 m de diámetro, y una potencia nominal de 300 kW, sujeto a unos 20 m de profundidad al fondo marino y con corrientes de 2,4 m/s. Ante los buenos resultados de este proyecto se decidió realizar para finales del año 2013 siete turbinas de 1,5 MW a 25 m de profundidad en la costa de Gales [15].



Figura 4. Turbina Kobold de tipo Darrieus. Fuente [16].

En la actualidad existen varias empresas enfrascadas en proyectos y plantas generando energía a partir de las mareas y corrientes marina [17], [16], [4], [18].



Figura 5. Turbina de 5 GWh desarrollada por SeaGen. Fuente [16].

1.2.1.2 Generación de energía por ríos

Para este tipo de generación la potencia entregada por unidad es típicamente mayor a 2 kW, para velocidades de corrientes de 0,6 a 2 m/s, siendo su uso propicio para el bombeo de agua, irrigación, iluminación y otras áreas de usos potenciales. Las turbinas hidrocínéticas no requieren de un mecanismo de viraje, pueden ser instaladas en cualquier emplazamiento con velocidades de corrientes mayores a los 0,5 m/s teniendo un impacto ambiental mínimo porque no suponen un obstáculo para la navegación ni para el movimiento de las especies migratorias. Además de ser compactas, se caracterizan por ser modulares, es decir, pueden ser instaladas de forma que en conjunto generan una potencia considerable.

En la literatura oficial disponible, el primer ejemplo de una turbina de río que fue desarrollado y probado en el campo se le atribuye a Pedro Garman [19]. Dicha iniciativa del *Intermediate Technology Development Group* (ITDG) en 1978 dio lugar a la denominada Turbina Garman la cual se utilizaba específicamente para el bombeo de agua y riego. En un plazo de unos cuatro años, se desarrollaron un total de nueve prototipos; los que fueron construidos y probados en Juba y Sudán en el Nilo Blanco (Figura 6). Estos diseños lograron trabajar por un total de 15 500 horas. La experiencia adquirida durante esta aventura mostro un resultado técnico y económico favorable.

El diseño consistía en un pontón flotante en el cual estaba amarrada la turbina de eje vertical que se encontraba completamente sumergida en el agua, y el cual todo el diseño estaba amarrado a un poste en la orilla del río para que esto no se lo llevara la corriente [7].



Figura 6. *Turbina Garman, diseñada por ITDG. Fuente: [20]*

Otro diseño desarrollado en Australia, el cual fue conocido como Turbina Tyson [20] consistía en un rotor sumergido de eje horizontal con un mecanismo de transmisión de 90 grados, que alimenta un generador montado en un pontón (Figura 7). Un nuevo concepto belga para este tipo de generador que contenía un pontón tubular doble con turbina y una noria de hoja recta flotante se puso a prueba en el Zaire, África.



Figura 7. *Turbina Tyson. Fuente:[20]*

Otras informaciones sobre varios diseños similares con rotores de eje horizontal y vertical que se probaron en las regiones amazónicas de Brasil para más información se describen en el artículo [21]. También se muestran otras

experiencias en Argentina [22] y en Canadá mediante Alternativa *HydroSolutionsLtd* [23].

En enero del 2009 se instala en Estados Unidos la primera turbina comercial en las aguas del río Mississippi, cerca de Hasting, Minnesota. La turbina desarrollada por la empresa *Hydro Green Energy*, tiene una potencia de 100 kW y fue instalada en la cercanía de una central hidroeléctrica preexistente. En estos momentos se espera la instalación de una segunda de 125 kW [24].

Al igual que con la energía de las corrientes marinas, las de los ríos se ha ido expandiendo desarrollándose varios proyectos y compañías en este campo [4], [16], [18], [25].

Un diseño recientemente desarrollado por Alexander M. Gorlov [8] en la Universidad de Northeastern, en Boston, EE.UU. ha logrado una significativa atención tanto para su utilización en ríos, como para el aprovechamiento de las corrientes marinas. La llamada turbina Gorlov helicoidal, GHT emplea una serie de cuchillas trenzadas con una curvatura helicoidal. Este diseño posee una mejor modularidad, escalabilidad y economía.

1.2.2 Turbinas hidrocínéticas

Descripción de las turbinas

Una turbina, es una máquina la cual transforma la energía causada por el fluido que atraviesa un eje rotativo en energía eléctrica. Es decir, al pasar el fluido por los alabes de la máquina, parte de su energía la absorbe la máquina en forma de movimiento giratorio por lo que frenará el fluido a la salida de la máquina. El fluido puede ser líquido, como es este caso el agua de un canal, o gaseoso como pueden ser las turbinas de los aerogeneradores, las turbinas de vapor y las turbinas de gas.

Clasificación de las turbinas hidrocínéticas

Tomando como referencia la dirección del flujo de agua y su alineación con respecto al eje del rotor, se podrían formar dos clasificaciones genéricas [3], [26], [27] [28], [25]. Estas son las turbinas de flujo axial y las de flujo cruzado. Las turbinas axiales tienen ejes paralelos al flujo de fluido y emplean rotores de tipo hélice. Por otra parte, los tipos de flujo cruzado encuentran ortogonal flujo

de agua al eje del rotor y en su mayoría aparecen como estructuras cilíndricas que giran (Figura 8).

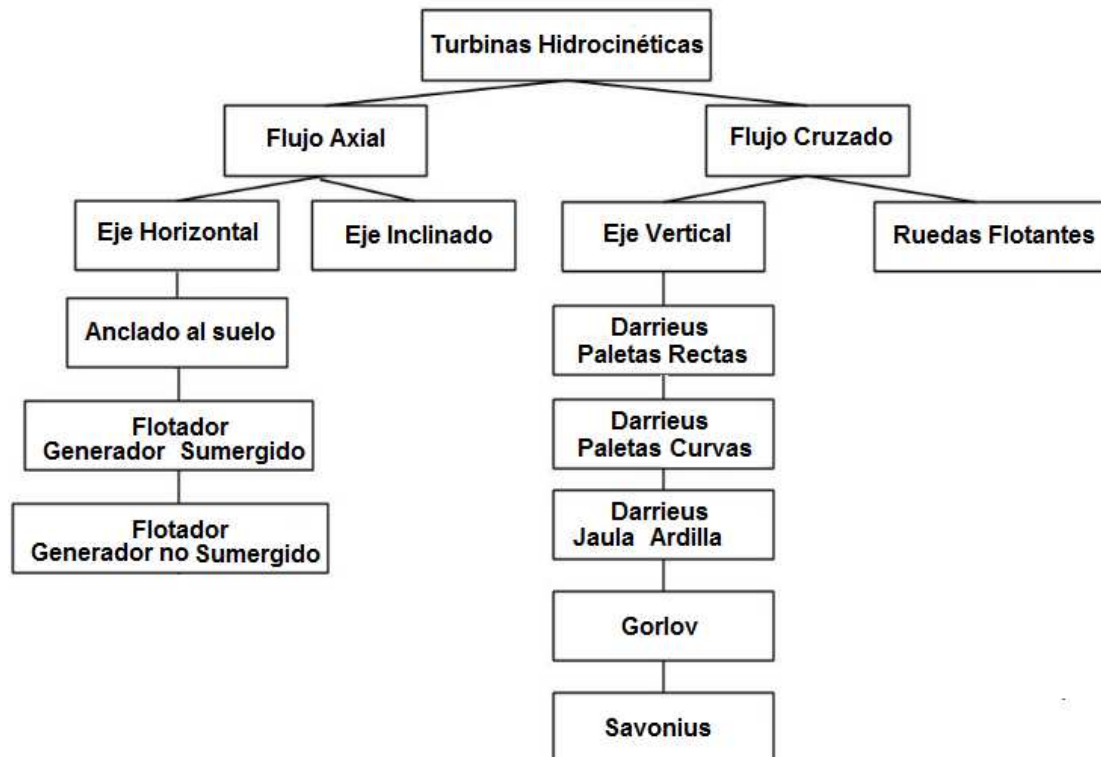


Figura 8. Clasificación de las turbinas convencionales. Fuente:[2].

1.2.2.1 Turbinas de eje horizontal

Las turbinas de flujo axial, se clasifican en dos grupos, eje inclinado, estas han sido diseñadas para pequeños ríos [2] y las turbinas de eje recto o de eje horizontal.

Las turbinas de eje inclinado (Figura 9.a), son muy comunes en aplicaciones de energía en los ríos. Dentro de las turbinas de eje horizontal, el generador de la turbina puede estar, completamente sumergido (Figura 9.b), parcialmente sumergido (Figura 9.c), o fuera del agua (Figura 9.d). En cuanto a diseño y concepto tienen una gran similitud con los aerogeneradores que se utilizan hoy en día. Aunque también existen este tipo de turbinas en los ríos, la mayoría de las turbinas axiales se utilizan en corrientes marinas, las cuales suelen tener un amarre rígido ó con configuraciones de generadores sumergidos.

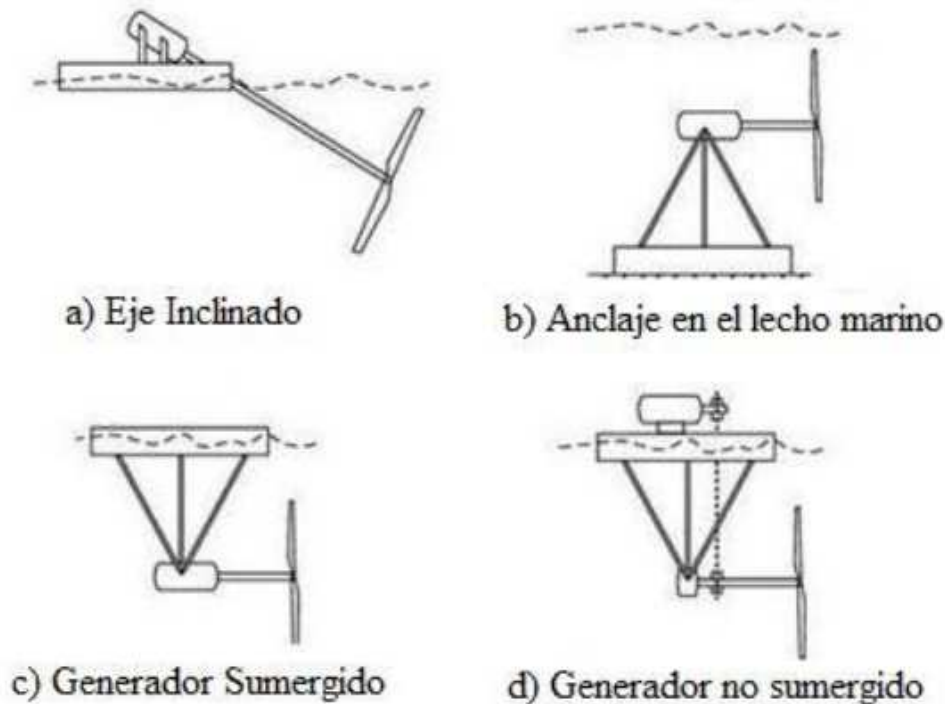


Figura 9. Turbinas de eje horizontal. Fuente[2].

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el diseño de las turbinas axiales normalmente emplea rotores tipo hélice.

1.2.2.2 Turbina de flujo cruzado

En el grupo de las turbinas que funcionan transversales al flujo, hay mayor variedad que en el grupo de las axiales, además, la mayoría de las turbinas tienen la ventaja de que pueden funcionar con el flujo bidireccional. La más básica, es la rueda flotante, la cual está diseñada de tal forma que normalmente, el eje del rotor está o bien en la superficie o por encima de la superficie del agua, para que sea más fácil mover la rueda. Este tipo de dispositivo está basado principalmente en el arrastre del agua, por lo que inherentemente son menos eficientes que las otras turbinas. (Figura 10 a)

1.2.2.3 Turbinas de eje vertical

En las turbinas de eje vertical existe una mayor variedad. Estas se clasifican en turbinas de tipo Darrieus y sus variantes (Figura 10b,c,d), son las que más se han utilizado hasta el día de hoy aunque están siendo desplazadas por la de

tipo Gorlov. Este tipo de turbinas, han sido muy comunes en aplicaciones de energía de ríos y canales.

Otro tipo de turbinas de eje vertical son las turbinas Gorlov, (Figura 10.e) las cuales se caracterizan porque en las palas tienen forma helicoidales. Y por último, en este grupo, se encuentran las turbinas Savonius (Figura 10.f) las cuales son un dispositivo de arrastre que tiende a tener las palas de forma torcida (en forma de S), es decir se asemejaría a un medio barril cortado longitudinalmente. Estas son las turbinas verticales que más se utilizan en la actualidad debido a su fácil implementación, pero son de baja eficiencia.

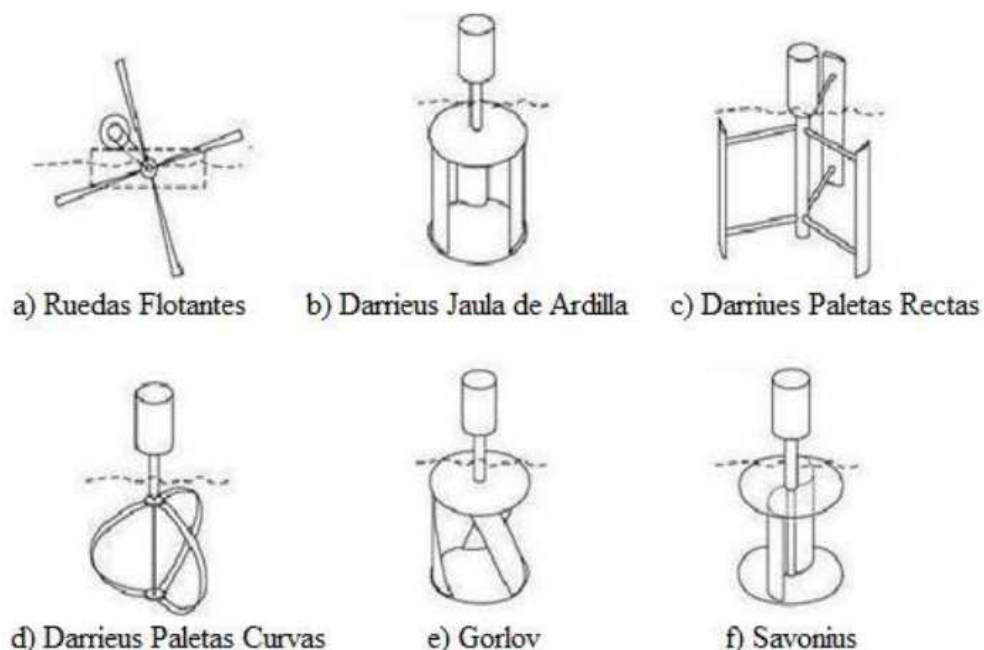


Figura 10. Turbina de eje vertical Fuente:[2].

También se puede hacer otra clasificación de turbinas, dependiendo de la elevación de las palas; por el tipo de arrastre; según la orientación del flujo del rotor (arriba-abajo) ó según el mecanismo del cabeceo de las palas. Aunque estas clasificaciones existan, la descrita anteriormente es la más común en los artículos estudiados.

1.2.2.4 Turbinas de eje horizontal y vertical

El trabajo actual se va centrar en un estudio más exhaustivo sobre las turbinas de eje horizontal y eje vertical ya que este tipo de turbinas son las más comunes en el mercado actual.

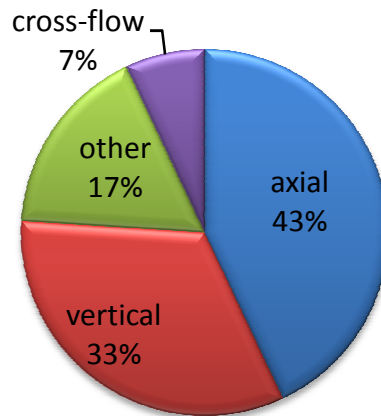


Figura 11. Distribución en el uso de las turbinas. Elaboración propia

En la imagen anterior, se puede observar, como en los sistemas de turbinas, las más comunes y por lo tanto las que más se utilizan, son las turbinas de eje horizontal (axial) 43% y las de eje vertical con un 33% [1].

La utilización de turbinas hidrocínéticas en las cuencas de los ríos, canales y corrientes marinas ofrecen una serie de ventajas en comparación con los otros tipos de fuentes de generación renovables y además ventajas económicas significativas a la comunidad local. Desde el punto de vista de su diseño e implementación, las principales ventajas asociadas con turbinas hidrocínéticas son:

- No poseen un cambio en las vías naturales del fluido: A diferencia de la energía eólica, el caudal del río, canal o corriente marina es predecible y unidireccional, lo que elimina la necesidad de cambiar la dirección de flujo o implementar un mecanismo de control rápido de dirección y permite orientación fija de los rotores de turbina para aplicación a largo plazo.
- Mayor nivel de extracción de energía debido a la colocación cerca de la superficie: El flujo de energía contenida en las corrientes de agua depende de la densidad del fluido, de la sección transversal y de la velocidad de dicho fluido. Por lo tanto, el máximo de energía puede ser extraída cuando la turbina se coloca cerca de la superficie del fluido.
- Trabajo mínima obra civil: Estas turbinas se colocan en la mayoría de los casos en mecanismos flotantes (ríos y mar), fijados a una estructura en la

superficie o en el lecho. Esto reduce significativamente la necesidad de obras de ingeniería civil. En el caso de los canales se fija a los extremos de este.

-. Reducción de los peligros del medio ambiente: En contraste con los sistemas hidroeléctricos grandes o micro, el impacto de las turbinas hidrocínéticas sobre el curso del río, de los ecosistemas y la vida silvestre es pequeña debido a su diseño escalable compacto.

-. El desarrollo de la tecnología necesaria: Las tecnologías básicas para estas turbinas, tales como cubo del rotor y la cuchilla, el generador, convertidores de potencia y otros están fácilmente disponibles en el mercado lo que reduce el coste global del sistema y permite menor nivel de sofisticación técnica para el funcionamiento apropiado de tales turbinas.

-. El uso del canal aumentación: El aumento del canal induce una presión más baja dentro de un área limitada que resulta en aumento de la velocidad del flujo. Las implementaciones de difusores en la turbina hidrocínética están sometidos a riesgos menores debido a su movimiento unidireccional y la colocación cerca de la superficie.

-. Diversidad de las Aplicaciones: El objetivo principal de las turbinas hidrocínéticas es la producción de electricidad que tiene múltiples otras aplicaciones que incluyen el bombeo de agua para el almacenamiento, la pequeña industria, los sistemas de riego, el consumo humano y lo más importante es la cero emisiones contaminantes para la generación de la misma cantidad de electricidad.

-. Ruido y Estética: A diferencia de la turbina de viento o la solar, la instalación submarina de turbinas hidrocínéticas no causa molestias de ruido y tiene impacto visual insignificante. El impacto en la navegación fluvial, natación y canotaje puede ser minimizado por el diseño eficiente. En lugares de instalación de turbinas, la colocación de puentes elevadizos o móviles también puede constituir una vía de navegación.

Tabla 1.1. Comparación entre el eje horizontal y las turbinas de flujo cruzado

Características	Turbinas axial	Turbinas Vertical/cruzado
Colocación	Amplio diseño que proporcionan flexibilidad en la selección de sistemas de montaje, tanto para una estructura anclada en el fondo (BSM), flotando (FSM) y cercana a la superficie (NSM).	Estas turbinas se colocan principalmente con arreglo NSM permitiendo que el generador sea colocado por encima del nivel del agua lo que resulta en una menor producción de energía.
Eficiencia	Poseer una mayor eficiencia debido a las pérdidas de incidencia inferiores. C_p (0.45)	Poseer una mayor eficiencia debido a las pérdidas de incidencia inferiores. C_p (0.35-0.15)
Autoarranque	Las cuchillas están diseñados para tener suficiente fuerza de arranque. Estas turbinas son auto arranque por naturaleza.	Estas turbinas sufren de torque bajo creando un problema significativo para los sitios de velocidad pequeñas.
Vibraciones	No son sometidos a vibración como resultado de continuos cambios en los ángulos de ataque.	Los álabes de turbina están sometidos a tirones cíclicos. Crea un problema serio si la frecuencia de vibración coincide con la frecuencia de resonancia de la estructura de soporte.
Simplicidad en el diseño	Llevan un diseño y mecanizado de palas más complejo, por lo que tienen	La simplicidad del diseño de las palas hace que este tipo de turbina sea más barato.

	un coste mayor.	
Acoplamiento del generador	El acoplamiento se suele hacer mediante engranajes que normalmente están sumergidos en el agua.	El generador se suele colocar en un extremo del eje permitiendo que este pueda estar por encima de la superficie del agua.
Emisión de ruidos	Tienden a meter más ruido debido a las pérdidas que se generan en la punta de la pala.	
Fluido asimétrico	Las turbinas horizontales no experimentan una variación de la velocidad del fluido.	La variación de la velocidad del fluido en canales poco profundos tiene menor impacto para un correcto funcionamiento. En estos casos, la parte superior de la turbina se enfrenta a mayor velocidad del fluido que la inferior. Sobre todo en turbinas cruzadas.

1.2.3 El uso de canal de aumento

A diferencia de la energía eólica, la variación del flujo del río, corrientes marinas o canales es más predecible y se encuentra en el intervalo de días. Por lo tanto, la necesidad de control de acción rápida y la aplicación de métodos de protección es menos estricta. La detección de la dirección del viento y la alineación de la turbina solo es necesaria para las turbinas eólicas. Por el contrario, el flujo del agua en un río o canal, es unidireccional y la colocación de una turbina con orientación podría bastar para la mayoría de las aplicaciones.

Los esquemas de aumento del flujo concentran el fluido en dirección a la turbina, esto implica un aumento de la velocidad del fluido y por consiguiente permiten un mayor nivel de extracción de energía. Aunque, la idea en principio fue aplicada a las turbinas eólicas, estas no tuvieron éxito esperado, debido a los muchos desafíos prácticos que se enfrentaban, tales como, la dirección de la cabeza de la torre, orientaciones variables de la dirección del viento, el peso y tamaño de estas turbinas. Sin embargo, el aumento de canales en las turbinas hidrocínicas parece más adecuada, y se adapta perfectamente a su empleo, ya que no necesita ningún cambio en la dirección, debido a que estas corrientes no varían su dirección o lo hacen muy poco en el tiempo. Podrían ser colocados bajo el agua y la estructura en sí puede funcionar además como un dispositivo de estabilización o flotación.

La utilización de los canales de aumento del fluido induce una presión inferior a la atmosférica dentro del área limitada a la turbina y por lo tanto aumentan la velocidad de flujo a través de esta. Si una turbina se coloca en un canal de este tipo, la velocidad alrededor del rotor sería mayor que la de un rotor en estado libre. Esto aumenta la posibilidad de generación total de energía de manera significativa, ya que como se verá posteriormente la energía es proporcional al cubo de la velocidad. Además, nos permite ayudar a controlar la velocidad del rotor y reducir problemas de diseño de baja velocidad en el tren de accionamiento.

A partir de varios ejemplos y modelos (Figura 12) se puede llegar a una clasificación[3], [29]. Un diseño simple puede consistir en una sola boquilla, el cilindro con el borde o difusor. En un diseño híbrido, los tres se pueden incorporar en una unidad. Cada uno de estos modelos viene con un conjunto único de características de rendimiento y limitaciones de diseño. Por ejemplo, los tipos híbridos funcionan mejor a un costo de mayor tamaño (de hasta 6 veces el diámetro del rotor).

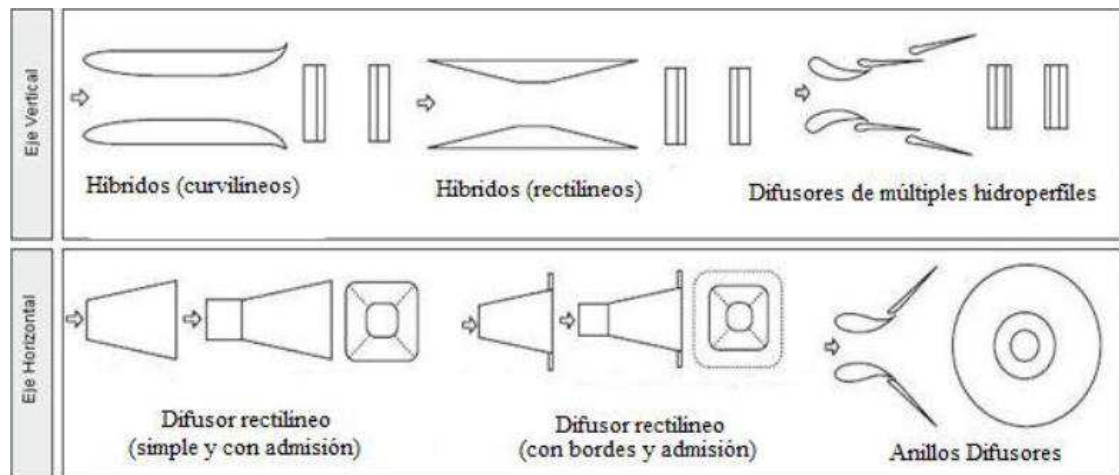


Figura 12. Distintos tipos de canales de aumento. Fuente: [29].

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

2.1 Diseño de la turbina tipo Savonius

El rotor Savonius, como anteriormente se ha comentado, es una turbina de eje vertical de tipo arrastre la cual fue inventado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1922. Los primeros rotores Savonius que se construyeron fueron turbinas eólicas pero, hoy en día, se ha demostrado que no son muy comunes ya que tienen una eficiencia mucho menor que las turbinas de eje horizontal. También tiene el inconveniente que su rendimiento es de los más bajos en aerogeneradores de eje vertical.

A lo largo del tiempo, se ha ido estudiando este tipo de turbinas para mejorar la eficiencia. Se decidió realizar una turbina de este estilo por las siguientes ventajas. [28]

- Tiene una construcción simple y de bajo costo.
- Genera poco ruido
- Capacidad de aceptar el fluido desde cualquier dirección.
- Tiene buenas características de arranque.
- Para la generación de energía, es muy fácil de acoplar con el generador.
- Tiene un mantenimiento sencillo.

La forma básica que tienen las turbinas Savonius es de un rotor tipo 'S', donde se solapan dos láminas en medio de un punto. El funcionamiento de este tipo de turbinas se basa en la diferencia de la fuerza de arrastre entre la pala cóncava y la convexa. El coeficiente de arrastre en la superficie cóncava es mayor que en la superficie convexa siendo 2,3 y 1,33 respectivamente para un flujo laminar (Figura 13) [30].

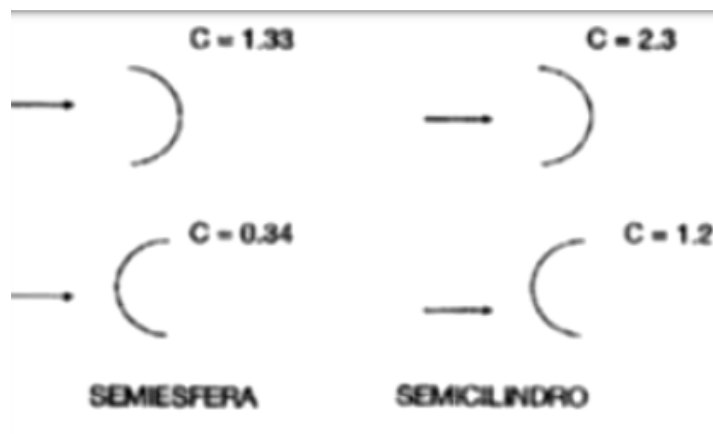


Figura 13. Valores de los coeficientes de resistencia para una semiesfera y un semicilindro. Fuerte: [30]

2.2 Datos hidráulicos de la provincia de Pinar del Río

Según el instituto nacional de recursos hidráulicos, en Pinar del Río existen un total de 21 presas, 12 obras de protección contra inundaciones y 13 derivadores con un gasto de entre 4 y 20 m³/s, además de 13 canales magistrales con una longitud total de 102.4 Km y un gasto que oscila entre 5 y 30 m³/s, siendo el promedio de 13 m³/s, el más extenso de los canales es el de Los Palacios-Bacunagua con 15.7 Km y un gasto de 20 m³/s. Para nuestro trabajo se escogió el canal Guama-El punto con una longitud de 5.30 Km y un gasto de 6 m³/s, debido a su cercanía con la ciudad de Pinar del Río y su constante circulación de agua, ya que deriva del río Guama, aunque en los meses de seca el gasto es poco, según datos del INRH.

El comportamiento de la altura y velocidad del agua en este canal durante el pasado año 2014 se muestra en la tabla, siendo los meses de lluvia los de mayor aprovechamiento.

Tabla 2.1 Promedio mensual de la altura y caudal del canal en el año 2014.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H (m)	0.98	0.87	0.75	0.60	0.92	1.02	1.25	1.22	1.30	1.07	0.90	0.89
Q(m ³ /s)	0.88	0.85	0.70	0.55	0.95	1.07	1.37	1.34	1.35	1.09	0.89	0.87

Para el siguiente proyecto se va a escoger una velocidad media del agua de 1,5 m/s.

2.3 Aspectos teóricos

Para poder realizar el diseño de la turbina de río, se debe tener en cuenta diferentes factores. Uno de ellos es el caudal volumétrico que va a tener el río, así como la sección transversal del canal.

El emplazamiento, también es un factor muy importante que hay que tener en cuenta en los canales o el espacio útil para colocar la turbina. También podría haber diferentes tipos de partículas en suspensión y materiales (peces, restos, roca, etc.) en el río y los canales dependiendo de la localización geográfica.

2.3.1 Potencia cinética de un fluido

La energía cinética que tiene un fluido viene dada por la siguiente ecuación:

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Donde:

Ec : energía cinética [J]

m : masa [kg]

v : velocidad del fluido [m/s]

La potencia es la derivada de la energía respecto el tiempo. Suponiendo que la velocidad del agua del canal va a ser constante:

$$P = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (2.2)$$

Donde

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av$$

Por lo tanto sustituyendo las dos ecuaciones anteriores se llega a la expresión de la potencia teórica que tiene una turbina hidrocínética:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

Donde:

ρ : es la densidad del agua

A : es la sección transversal de la turbina

v : la velocidad del fluido.

Aunque la potencia teórica disponible en un canal tiende a ser alta, la potencia real, es decir, la potencia recuperable es mucho inferior.

El funcionamiento principal de las turbinas es absorber la energía cinética que tiene el canal de agua haciendo girar la turbina para posteriormente transferirla en el eje.

2.3.2 Ley de Betz

La ley de Betz es la teoría que explica la máxima energía posible que puede extraerse de una turbina de viento. Esta ley fue desarrollada por el físico alemán Albert Betz en 1919, décadas antes de que llegara las turbinas tripalas actual para la generación de electricidad.

Demostración

El límite de Betz se conoce como la máxima energía posible que puede extraerse de un rotor infinitamente delgado, de un fluido que circula a una determinada velocidad y fue desarrollado para turbinas eólicas. La teoría de Betz supone un rotor eólico ideal (sin pérdidas), que funciona según el empuje aerodinámico propulsado por un viento que fluye a una velocidad constante v .

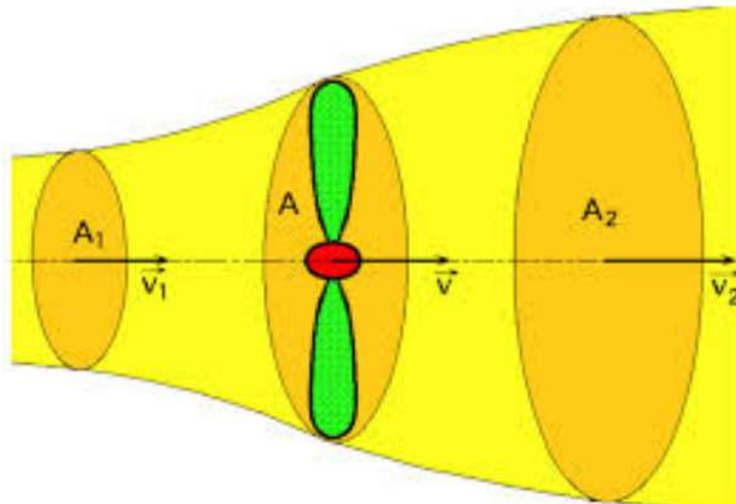


Figura 14. Comportamiento de la velocidad del viento de un rotor en condiciones ideales. Fuente [29].

Suponiendo que la energía eólica se puede recuperar y transformar mediante un aerogenerador. La pala se supone inmersa a una corriente de aire de velocidad v que después de la turbina poseerá una velocidad v_2 no nula, por lo que asegura que la transformación y recuperación de toda la energía del viento en otra forma de energía.

También se supondrá que antes de la pala, el aire circula por un tubo de corriente a una velocidad v_1 de sección transversal A_1 . Esta será la velocidad del viento sin perturbar. Después de la pala, el fluido llevará una velocidad v_2 con otra sección transversal A_2 . En la pala, la sección transversal del disco será de sección A con una velocidad útil del viento v .

Siendo $v_2 < v < v_1$

Los resultados que se obtienen en la ley de Betz son válidos bajo condiciones idealizadas del rotor así como del viento:

- En el rotor no existen pérdidas mecánicas ni aerodinámicas y tiene un número infinito de palas.
- El aire está exento de fricción y es incompresible.

- La corriente del fluido antes y después del rotor es laminar. Esto hace que el rotor extraiga la energía del viento sin perturbar la corriente ideal, teniendo la presión estática de aire constante antes y después del rotor.

Suponiendo un flujo másico \dot{m} que circula por un tubo:

$$\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2 \quad (2.4)$$

Utilizando la variación de la energía se puede calcular la potencia:

$$P = \frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.5)$$

La fuerza ejercida por el rotor del fluido:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \Delta v = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (2.6)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \quad (2.7)$$

Las dos expresiones de potencia son validas para expresar la energía [6] y [7]. La primera se ha obtenido por el primer principio de conservación de la energía y la otra mediante el trabajo diferencial realizado. Igualando estas dos expresiones:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A v^2 (v_1 - v_2)$$

Siendo

$$(v_1^2 - v_2^2) = (v_1 + v_2)(v_1 - v_2)$$

$$\frac{1}{2} (v_1 + v_2)(v_1 - v_2) = \frac{1}{2} v (v_1 - v_2)$$

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (2.8)$$

Efectivamente, la velocidad del viento cuando esté en el rotor se puede tomar como la media entre las velocidades antes y después del rotor. Para calcular el máximo rendimiento según la ley de Betz se realiza el siguiente desarrollo.

Teniendo en cuenta la ecuación de la potencia basada en la energía cinética;

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.8:

$$\dot{E} = \frac{\rho A(v_1 - v_2)}{4} (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad (2.10)$$

Para obtener el valor máximo de la expresión anterior, su primera derivada respecto v_1/v_2 debe de ser igual a cero.

$$a = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{d\dot{E}}{da} = 0; \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (2.11)$$

Esto demuestra que el coeficiente máximo de potencia es:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.592 \quad (2.12)$$

El resultado del coeficiente de Betz, demuestra que ninguna máquina eólica puede superar este coeficiente de potencia máximo.

Por lo que, la potencia máxima para una turbina será:

$$P_{max} = 0.592 * \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3 \quad (2.13)$$

Aunque este desarrollo del límite de Betz se toma como válido para el diseño de generadores hidrocinéticos, en canales y ríos se dan otras condiciones adicionales que pueden influir en los resultados finales de la potencia, como por ejemplo las corrientes por lo general no son laminares y en el caso de los canales estas se encuentran encerradas en sus extremos. Hoy en día no se encuentran referencias a trabajos investigativos de este tipo.

2.3.3 Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación es la fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo que se encuentra en el interior de un fluido. Esta fuerza es perpendicular a la dirección de la superficie del agua. Esta se expresa de la siguiente manera:

$$F_s = C_L \frac{1}{2} \rho A v_r^2 \quad (2.14)$$

Donde

C_L : coeficiente de sustentación

v_r : velocidad relativa del fluido

ρ : densidad del agua

A : área de la turbina

2.3.4 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre, es la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo que está en el interior del fluido, en este caso la turbina. Esta fuerza es paralela a la dirección que marca el movimiento relativo del fluido, por lo que esta fuerza será quién genere el movimiento en la turbina.

Dicha fuerza se expresa como:

$$F_a = C_D \frac{1}{2} \rho A v_r^2 \quad (2.15)$$

Donde

C_L : coeficiente de sustentación

v_r : velocidad relativa del fluido

ρ : densidad del agua

A : área de la turbina

Teniendo en cuenta que va a haber dos fuerzas, F y F' ya que actúan sobre las dos palas opuestas, serán determinadas por las siguientes expresiones:

$$F = \frac{1}{2} C_p \rho A (v - u)^2$$

$$F' = \frac{1}{2} C'_p \rho A (v + u)^2$$

Donde:

u : velocidad lineal de las palas ($u = \omega \cdot R$)

v : velocidad absoluta del fluido

$v - u$: velocidad relativa del fluido en la pala cóncava

$v + u$: velocidad relativa del viento en la pala convexa

La potencia que desarrolla el flujo sobre la turbina será la fuerza resultante por la velocidad lineal de las palas:

$$P = (F - F')u = \frac{1}{2} \rho A u [C_p (v - u)^2 - C'_p (v + u)^2] \quad (2.16)$$

Como anteriormente se ha mencionado los coeficientes C_p y C'_p para un rotor semicilíndrico tienen un valor de 2,3 y 1,33 respectivamente.

2.4 Parámetros a tener en cuenta para el diseño de la turbina

2.4.1 Condiciones externas

La turbina Savonius que se desea diseñar, se va a instalar en un canal situado a la salida de la central hidroeléctrica. Las condiciones ambientales donde se va a instalar la turbina son las siguientes:

- Dimensiones del canal: ancho 1,3 m y profundidad 0,97 m
- Temperatura del agua 20 °C
- Densidad 998,2 kg/m³
- Velocidad del fluido 1,5 m/s.

2.4.2 Condiciones internas

Las condiciones internas de la turbina, son con las que se van a tender a realizar el diseño características de la turbina Savonius.

Velocidad específica

La eficiencia de las turbinas hidrocínéticas dependen de diferentes factores los cuales muchos están ligados al diseño. El coeficiente de potencia (C_p) y la *relación de velocidad de punta* de la turbina λ , se utilizan para ilustrar la eficiencia de la turbina. La relación de velocidad de punta relaciona la velocidad que hay en la punta de la pala y la velocidad a la que fluye el agua. Se expresa como:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (2.17)$$

Donde

λ : Velocidad específica

ω : Velocidad angular [rad/s]

R : radio de la turbina hidráulica [m]

v : velocidad del fluido [m/s]

A continuación se muestra una gráfica de los diferentes tipos de turbinas, (Figura 15) el coeficiente de potencia (C_p) frente a la relación de velocidad en punta de la pala.

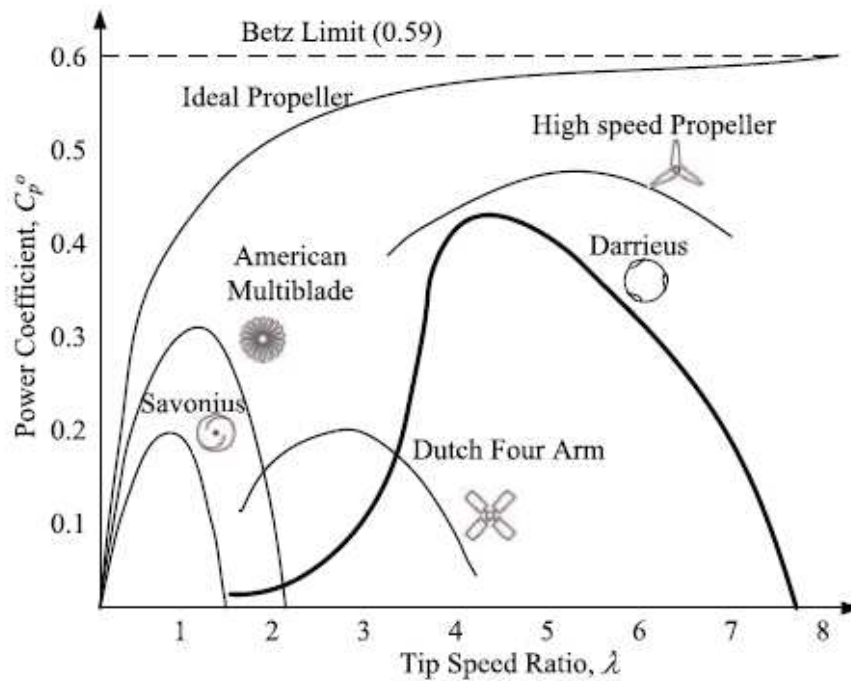


Figura 15. Gráfica del coeficiente de potencia frente a λ . Fuente[19].

Tanto la ecuación de la relación de velocidad de punta λ como el coeficiente de potencia C_p pueden ser bastante lógicos de entender. Cuando las palas de la turbina giran demasiado lentas, sin frenar prácticamente el fluido significa que no está capturando la energía cinética necesaria y por lo tanto el C_p será bajo. En cambio si giran demasiado rápido, lo más probable es que se esté generando turbulencias en el agua por lo que también tenderá a disminuir la eficiencia de esta. Por lo tanto se debe encontrar una velocidad de giro lo suficiente elevada para que genere un C_p máximo pero sin que el agua llegue a ser turbulento. Los rotores Savonius helicoidales tienden a tener una relación de punta de $\lambda = 0,9$. (28) Teniendo en cuenta que la velocidad del fluido es de 1,5 m/s y el radio de la turbina de $R = 540$ mm, metiendo los valores en la ecuación 2.17:

$$\omega = 25 \text{ RPM}$$

Coeficiente de potencia (C_p)

El coeficiente de potencia depende del diseño de la turbina, de la relación que existe entre la separación entre palas (e) y el diámetro de la pala (d) $e/d=1/6$. Según los estudios realizados para este tipo de turbina Savonius[30], el C_p se hace máximo cuando $\lambda=0,9$. La turbina del presente trabajo, se ha diseñado

teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente. En la siguiente gráfica se puede observar como varía el coeficiente de potencia (C_p) y el coeficiente de par (C_m) según la velocidad específica, λ .

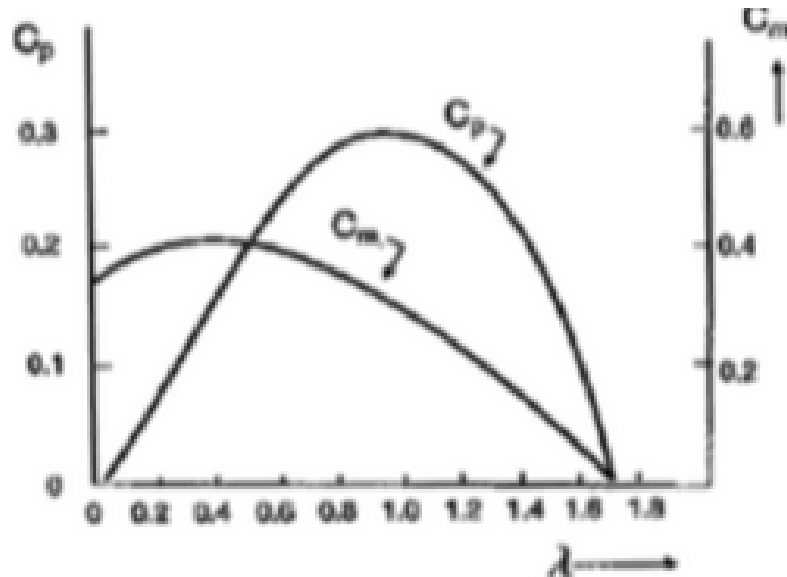


Figura 16. Coeficiente de potencia (C_p) y par (C_m) frente a velocidad específica λ . Fuente [30].

El coeficiente de potencia se expresa como:

$$C_p = \frac{P_{generada}}{P_{maxima}} \quad (2.18)$$

$$C_p = \frac{\frac{1}{2}\rho A(v-u)^2 v_r}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = 4a(1-a)^2$$

$$a = \frac{v-u}{v} = \frac{1}{2} \left(\frac{v-v_2}{v} \right)$$

Donde:

ρ : densidad del agua

A : área de la turbina

$v_r = (v - u)$: velocidad relativa del fluido

v : velocidad del fluido

u : velocidad en la periferia de las palas de la turbina ($u = R\omega$)

v_2 : velocidad del agua a la salida de la turbina.

Teniendo en cuenta las velocidades calculadas anteriormente, para el presente diseño, se ha obtenido un **Cp = 0,3**.

Determinación del número de palas

Entre las características principales del diseño de la turbina está determinar el número de palas que va a tener la turbina. Por diversos estudios, se ha determinado que el número óptimo de aspas debe de ser dos. *SivaseGaram, Shankar y Sandia Laboratories* hallaron que el coeficiente de potencia máximo para un rotor de dos aspas es del 30, 50% siempre mayor que una turbina de 3 palas. Esto es debido a la interferencia del flujo entre las aspas que producen flujos secundarios, separación y turbulencia [30]. Para evitar las fuertes variaciones del momento que sufre la turbina al girar, se deben colocar rotores desfasados, uno encima del otro (con el eje en común) y así se evitará el par negativo que se genera cuando la turbina gira (Figura 17).

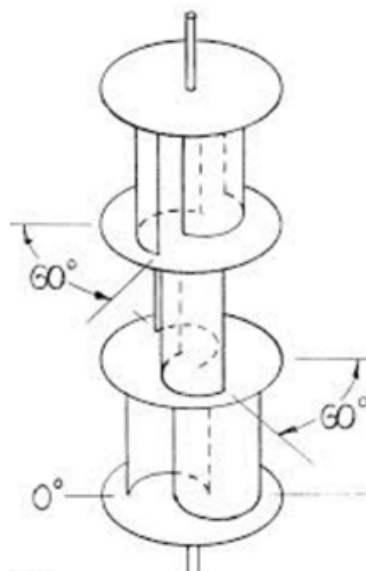


Figura 17. Rotor Savonius con 3 módulos. Fuente [30].

Pero para poder realizar ese diseño, el río o el canal debe de tener una altura lo suficientemente grande para que se quede completamente sumergido. Por eso es que para el presente trabajo final de grado, se decidió diseñar una turbina de dos palas con un solo módulo.

Relación de superposición

Relación de superposición (β), es la relación que existe entre la distancia de las palas (e) y el diámetro de la pala (d). Esta relación está extremadamente ligada con la eficiencia de la turbina, por lo que es un parámetro muy importante.

$$\beta = \frac{e}{d} \quad (2.19)$$

Los valores óptimos para que el coeficiente de potencia sea máximo se dan cuando β es igual a 0,6.

Ángulo del arco de la pala

Este es el ángulo que debe de tener el perfil de la pala para aumentar el coeficiente de potencia. La turbina Savonius tiende a tener un arco de aproximadamente 124° (Figura 18).

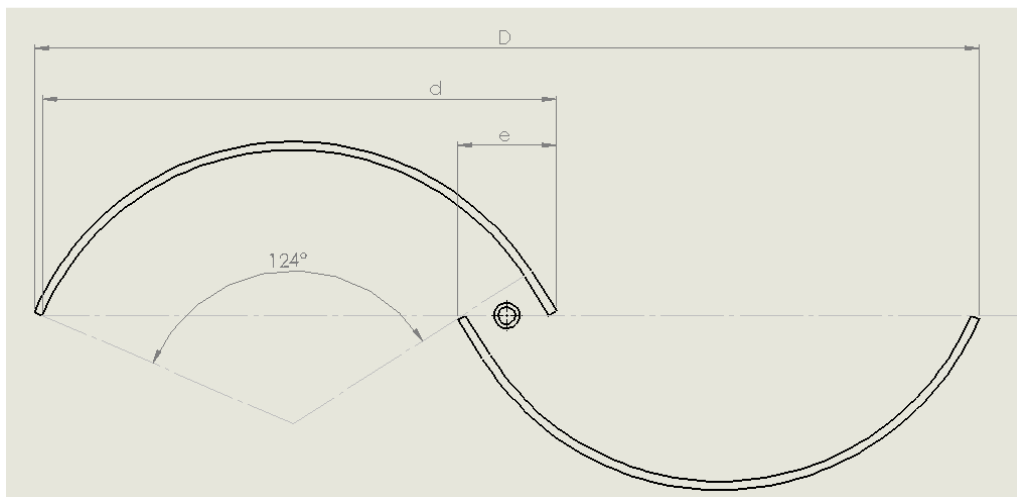


Figura 18. Parámetros de la turbina. Fuente Elaboración propia

Relación del diámetro de la turbina entre la distancia entre palas

La relación que hay entre el diámetro de la turbina y la distancia entre palas para mejorar la eficiencia de la turbina, debe de estar comprendido entre unos valores:

$$\frac{1}{20} \leq \frac{e}{D} \leq \frac{1}{10} \tag{2.20}$$

2.5 Cálculo y diseño

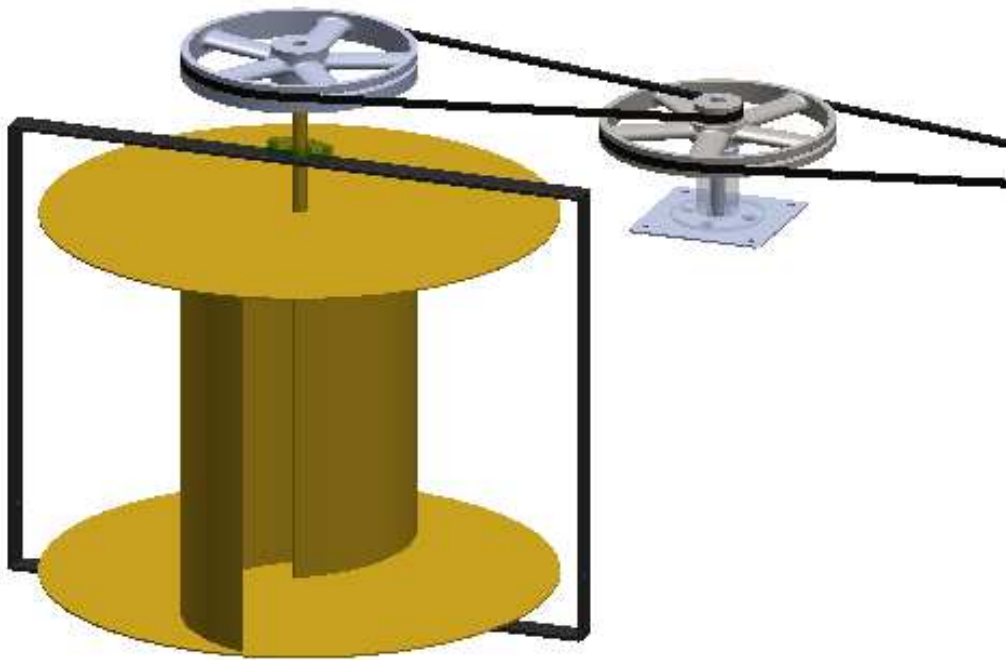


Figura 19. Conjunto de turbina hidrocínética tipo Savonius. *Elaboración propia.*

Una vez estudiados los aspectos teóricos para una turbina Savonius, se ha realizado un modelo (Figura 19) el cual intentará satisfacer las necesidades que anteriormente se planteó, teniendo en cuenta las dimensiones del canal donde se va a instalar (ancho 1,3 m y profundidad 0,97 m), la facilidad de instalación y fabricación y el bajo coste.

2.5.1 Diseño de los diferentes elementos de la turbina

-Diseño de las palas del rotor

Para el presente proyecto, se ha decidido realizar una turbina Savonius de acuerdo a las ventajas que anteriormente se han mencionado.

La turbina consta de dos palas semicirculares fabricadas en acero inoxidable austenítico, AISI 304.

Estas estarán unidas mediante dos tapas soldadas (una en la parte inferior y otra en la parte superior) al eje de la turbina. Es importante que a la hora del montaje

se respete la distancia que debe de haber entre palas y respecto del eje ya que esto garantizará mejor eficiencia como anteriormente se ha comentado. (Figura 20).

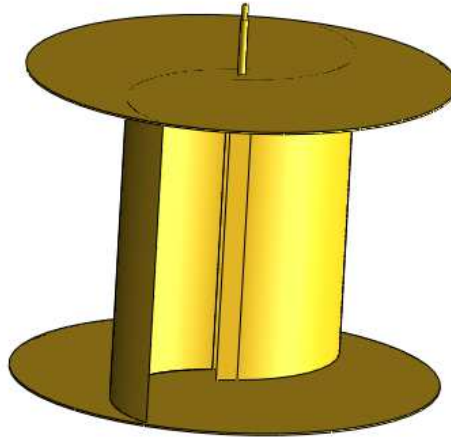


Figura 20. *Turbina Savonius. Elaboración propia*

El rotor se ha diseñado teniendo en cuenta las dimensiones del canal de río donde se va a instalar, este tiene una anchura de 1,3 m y una profundidad de 0,97 m. Como se puede comprobar, es un canal bastante pequeño por lo que el diseño del rotor se ve muy limitado a la hora de decidir las dimensiones. Se ha decidido realizarlo con la máxima sección del rotor posible para conseguir la máxima potencia posible, por lo que las dimensiones del rotor serán de una altura de $H=0,8\text{m}$ y una anchura de $L=1,08\text{ m}$.

- Eje de la turbina

El eje es el elemento que une el rotor, la estructura de la turbina y el sistema de transmisión de este. Es uno de los elementos más importantes de la turbina ya que gracias a este, a través de poleas, se transmitirá el movimiento al generador eléctrico.

Va a estar fabricado del mismo material que las palas, es decir, en acero inoxidable austenítico AISI 304 (Figura 21). El eje irá apoyado en la parte inferior mediante un rodamiento axial rígido de bolas a la estructura, así se conseguirá que el eje se encuentre en voladizo para poder facilitar las labores de mantenimiento. En la parte superior irá alojado el volante de inercia el cual será el

que transmite el movimiento al generador. Apoyado en la barra superior de la estructura se colocará otro rodamiento rígido de bolas, el cual soportará parte de la fuerza radial que aparezca en el eje.

Se va a realizar un eje macizo de acero inoxidable con un diámetro de 30 mm y una longitud de 1330 mm. En cuanto a su fabricación, se deberá prestar especial atención con las tolerancias de la parte superior e inferior del eje ya que irán alojados rodamientos y el volante de inercia.



Figura 21. Eje de la turbina hidrocínética. Fuente: Elaboración propia

-Volante de inercia

El giro que genera las palas debido a la fuerza del agua no va a llevar una velocidad constante. Esto es debido a la forma que van a tener las palas y el número de palas que serán dos. Para amortiguar estos cambios de velocidad angular y conseguir una velocidad constante, se va a colocar un volante de inercia en la parte superior del eje del rotor. Además se va a aprovechar esta pieza como polea para transmitir el movimiento circular hacia el generador eléctrico. (Figura 22)

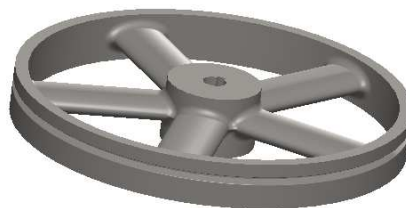


Figura 22. Volante de inercia y polea. Fuente: Elaboración propia

-Sistema de transmisión del movimiento

La transmisión del movimiento creada por la turbina, se va a realizar mediante polea-correa. Teniendo en cuenta que la velocidad angular que lleva el eje de la turbina es muy pequeña, será necesario aumentar la velocidad para que el

generador eléctrico pueda funcionar correctamente. Para ello, dependiendo de la velocidad del eje de la turbina y del generador, se procederá al cálculo de la relación de transmisión. Teniendo en cuenta que la velocidad del rotor va a ser de 25 RPM y el generador seleccionado para que trabaje en condiciones deseadas debe de tener una velocidad de 250 RPM, se debe realizar una relación de transmisión entre poleas de $i=10$. Al ser una relación muy elevada, se va a diseñar la relación con un árbol de transmisión intermedio, es decir en dos partes con relaciones de transmisión de $i'=5$. (Figura 23)

Para conseguir esta relación de transmisión se colocarán dos ruedas de 500 mm de diámetro primitivo unidas mediante una correa a otras dos ruedas de diámetro primitivo de 100 mm. Las dos poleas de mayor tamaño serán las dos ruedas motoras. Las dos poleas intermedias, se mecanizarán de tal forma que sean una sola única pieza, así se evitarán pérdidas en la transmisión del giro. La polea doble, se colocará de tal forma que la polea de mayor tamaño se quede en la parte inferior para dar mayor estabilidad al eje. Tanto las poleas como el volante de inercia, para conseguir un buen traspaso del giro, van a ir amarradas al eje mediante chavetas. Todas ellas estarán fabricadas en hierro fundido (densidad 8760 kg/m^3). Posteriormente se mecanizarán las ranuras donde irán alojadas las correas. Se ha decidido este material ya que es una fundición sencilla y suficientemente resistente para las fuerzas y desgaste a las que se van a someter. Las correas de transmisión serán correas de caucho normalizadas, con ángulo de 38° .



Figura 23. Relación de transmisión mediante ejes. Fuente: Elaboración propia

- Placa base, soporte y eje de polea doble

La polea doble irá montada en un soporte que se colocará fuera del canal. Se mecanizará un soporte simple ya que su única función será sujetar la polea doble. Este soporte irá anclado a una plancha que anteriormente se ha montado en el

hormigón del canal, esta deberá tener una planitud buena ya que las poleas deben de estar lo más rectas posibles para evitar desviaciones en las correas. Para ello, se harán 4 agujeros en la tierra, se meterán los cuatro anclajes de gancho, y se rellenará con hormigón. Luego se colocará una placa la cual se amarrará mediante esos anclajes. Esta placa servirá para colocar el soporte de la polea. Este en la base se ha mecanizado 4 ranuras para ajustarlo y hacer más fácil la labor de mantenimiento de las correas de las poleas (Figura 24). En la parte inferior del soporte irá montado un rodamiento cónico el cual soportará tanto la fuerza ejercida por el peso de las poleas como las fuerzas causadas por las correas. En la parte superior del soporte irá montado un rodamiento rígido de bolas simple el cual soportará las fuerzas radiales. Gracias a estos dos rodamientos, el eje se comportará como una viga bi-apoyada al igual que el eje principal de la turbina. En la parte superior del eje irá montada la polea doble. Tanto el eje como el soporte estarán mecanizados con un acero al carbono común como es el AISI 1023.

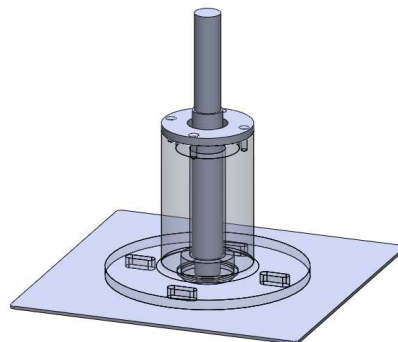


Figura 24. Soporte y eje de polea doble. Fuente: Elaboración propia.

- Selección del generador

El generador eléctrico va a convertir la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica. En este caso, se va a aprovechar un motor eléctrico de bicicleta que se tiene como generador eléctrico (Figura 25), por lo que no va a ser necesario diseñarlo. Éste va a trabajar como un generador síncrono de imanes permanentes sin escobillas. Concretamente es un motor *crystalte 400, modelo Saw-408* de 48 V.

Se escogió este generador por las siguientes ventajas:

- Mayor eficiencia y rendimiento
- Menos peso con la misma potencia
- Al no tener escobillas tiene un menor mantenimiento

El generador trabajará a 250 RPM dando una potencia de 700 W y una corriente de 40 A.

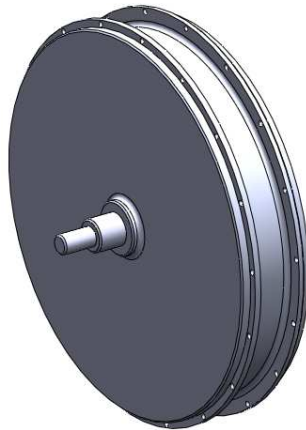


Figura 25. *Generador de la turbina. Fuente: Elaboración propia.*

- Estructura de la turbina

La turbina va a estar amarrada al canal mediante una estructura para poder garantizar una buena sujeción y que el sistema no sea arrastrado por el agua.

La estructura serán unas barras de acero inoxidable AISI 304 soldadas entre sí, con una anchura de 60 mm y un espesor de 10 mm (Figura 26). La sujeción entre el eje de la turbina y la estructura se hará mediante los rodamientos. Tanto en la parte superior como en la parte inferior de la estructura irán atornillados los porta rodamientos. La barra inferior de la turbina soportará todo el peso de la turbina hidráulica, pero esto no supone problema en cuando a esfuerzos ya que estará completamente apoyada en el fondo del canal.

La sujeción de la turbina al canal se realizará mediante dos pasadores con expansores que se colocarán en la parte inferior de las barras verticales de estructura a ambos lados, estos pasadores serán de diámetro 20 mm.

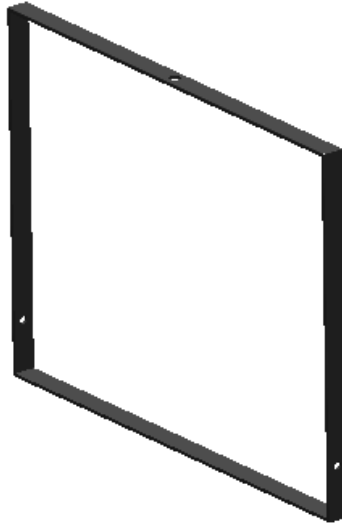


Figura 26. Estructura de sujeción. Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Cálculo del diámetro del rotor

Las dimensiones del rotor van a estar limitadas por la sección del canal. Mediante la ecuación de potencia extraíble se comprobará la potencia que dará la turbina según la dimensión que anteriormente se ha decidido.

$$P = C_p \rho A v^3 \eta_t \eta_g \quad (2.21)$$

Donde:

C_p : coeficiente de potencia (0,3)

ρ : densidad del agua (998,2 kg/m³)

A : sección de la turbina

v : velocidad del agua (1,5 m/s)

η_t : rendimiento de la transmisión

η_g : rendimiento del generador

-La sección de la turbina se ha calculado teniendo en cuenta que las palas van a ser semiesféricas:

$$A = 2 l \cdot H \quad (2.22)$$

Donde:

2 : número de palas

l : Longitud de la sección de la pala (mm)

H : Altura de la pala (800 mm)

$$l = 2\pi R_e \frac{\alpha}{360}$$

Donde

R_e : Radio exterior de la pala ($R = 326$ mm)

α : ángulo de la sección ($\alpha = 124^\circ$)

$$A = 1,13 \text{ m}^2$$

Anteriormente se determinó que para el perfil diseñado se va a tener unos rendimientos de transmisión y generador aproximados de 0,8. Por tanto:

$$P = 600 \text{ W}$$

Se puede comprobar que la potencia máxima admisible para las dimensiones que se han determinado es mucho mayor que la potencia que va a generar la turbina ya que la potencia necesaria que se desea es de 300 W.

2.5.3 Cálculo del espesor de las palas

Inicialmente se ha considerado un espesor de las palas, las cuales se han diseñado mediante el programa 3D *Solidworks* (2014) y se ha realizado la simulación del modelo, el cual posteriormente se ha comprobado el espesor elegido es válido para el correcto funcionamiento.

-Se ha optado por un espesor de pala de 2 mm.

Fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga se crea cuando un cuerpo se somete a rotación respecto de un eje, es la que tiene a alejar las palas de la turbina del eje de rotación. Se expresa como:

$$F = m\omega^2 R \quad (2.23)$$

Donde:

m : masa del cuerpo

ω : velocidad de rotación de las palas

R : radio de rotación

Se va a calcular la fuerza centrífuga a la que se ven sometidas las palas de la turbina. Este cálculo se realiza en el centro de gravedad de cada una de las palas. Para realizar los cálculos se ha tenido en cuenta que la pala es una sección semicilíndrica.

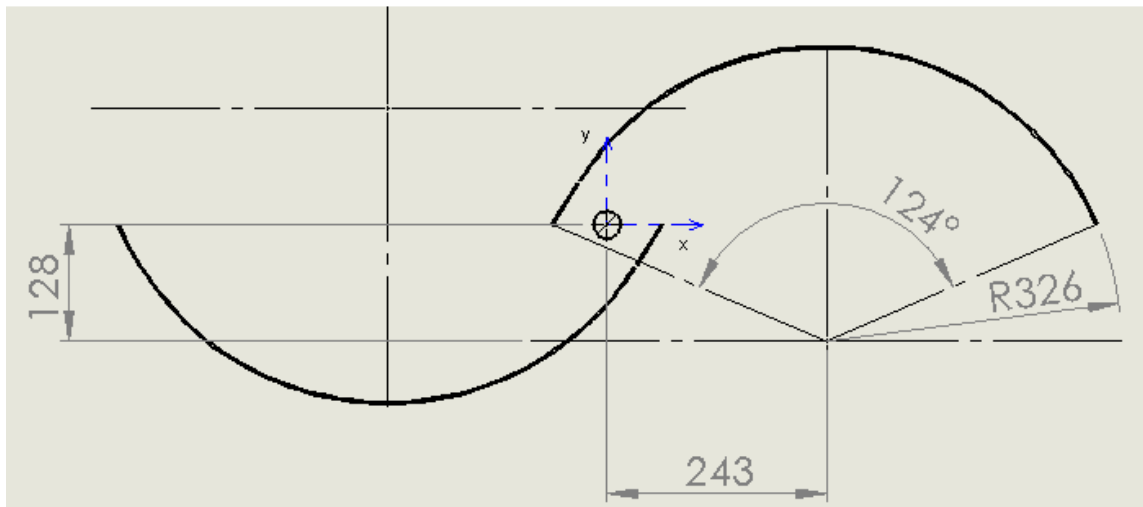


Figura 27. Dimensiones de la pala. Fuente Elaboración propia.

$$R_e = 326 \text{ mm}$$

$$R_i = 324 \text{ mm}$$

$$\alpha = 124^\circ$$

Cálculo de los centro de gravedad de las palas:

$$X_1 = 243 \text{ mm}$$

$$Y_1 = -128 + \frac{4 \cdot R_e}{3\pi} = 10,35 \text{ mm}$$

La distancia que hay desde el centro de gravedad de la pala hasta el eje de rotación del sistema:

$$r_{CG} = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} = 243,2 \text{ mm}$$

El cálculo de la masa de la pala

$$m = V \cdot \rho$$

Donde:

V : Volumen de la pala

ρ : Densidad de la pala

Calculando

$$V = \frac{\pi(R_e^2 - R_i^2)\alpha}{360} \cdot H$$

$$\rho = 8060 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = 9,1 \text{ kg}$$

Velocidad angular de la turbina

$$\omega = 2,5 \text{ rad/s}$$

Por lo tanto, la fuerza centrífuga será:

$$F = m\omega^2 R$$

$$F = 9,1 \cdot 2,5^2 \cdot 0,243$$

$$F = 13,88 \text{ N}$$

Se expresa en presión:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde

F : Fuerza centrífuga (N)

A : Área de la pala ($0,56\text{m}^2$)

$$P = 24,80 \text{ Pa}$$

Presión ejercida por el agua

Esta es la fuerza que ejerce el fluido al chocar con las palas de la turbina. Gracias a esta fuerza se genera el movimiento de la turbina. Esta fuerza se expresa como presión ya que es ejercida en toda la superficie de la pala.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.24)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido ($998,2 \text{ kg/m}^3$)

v : velocidad del fluido ($1,5 \text{ m/s}$)

Por lo tanto:

$$P_{\text{agua}} = 1\,123 \text{ Pa}$$

Una vez calculado las diferentes fuerzas que actúan sobre las palas, se ha introducido estos valores en el *análisis simulationexpres* del programa SolidWorks, con el cual se ha podido comprobar que el espesor de las palas es suficiente para que no se produzcan deformaciones (Figura 28). Esto se puede ver en el ANEXO 2.

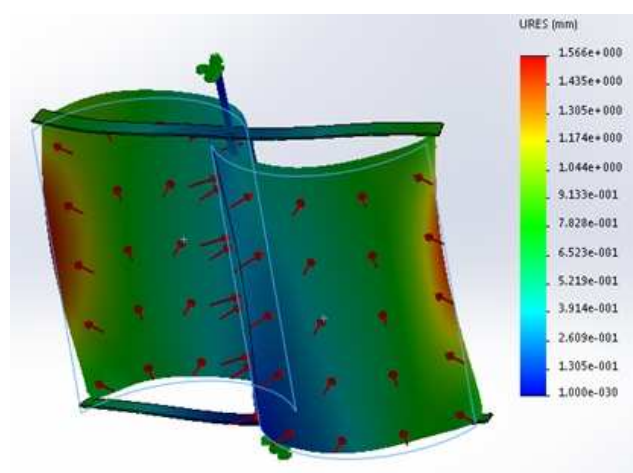


Figura 28. Análisis de deformación en Solidworks. Elaboración propia.

2.5.4 Determinación del espesor del eje

El eje es el componente principal de la turbina, ya que gracias a este se transmite el movimiento de la turbina al rotor. Se va a realizar un cálculo aproximado del eje del rotor. El eje va a soportar esfuerzos en dos planos diferentes, por un lado la fuerza debida al fluido, y por otro lado la fuerza debida a las tensiones de la correa de la polea. Por lo que los esfuerzos se calcularán por separado y posteriormente se sumarán los momentos máximos ya que será la condición más desfavorable.

- Fuerzas debida al agua:

Suponiendo que el fluido, en este caso el agua, se va a comportar como una carga puntual distribuida en dos puntos, a la altura de donde van soldadas las tapas de la turbina al eje. Se va a considerar como puntos de apoyo los dos rodamientos que se van a poner (uno en la parte superior y otro en la inferior).

$$F_{fluido} = P \cdot A$$

Donde

P : Presión ejercida por el agua en las palas (1123 Pa)

A : Área de la turbina (1,13 m²)

$$F_{fluido} = 1\,269\,N$$

A distribuir en dos cargas puntuales: $F = 634,5\,N$

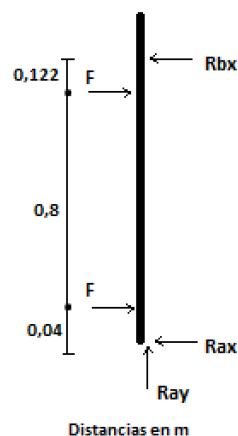


Figura 29. Esquema de la fuerza del fluido sobre el eje. Elaboración propia

Fuerzas resultantes sobre el eje

$$\sum F_y = 0 \quad R_{ay} = 0$$

$$\sum F_x = 0 \quad R_{ax} + R_{bx} = 1269$$

$$\sum M_a = 0 \quad R_{bx} \cdot 0,962 - 634,5 \cdot 0,04 - 634,5 \cdot (0,84) = 0$$

Los resultados en los puntos de apoyo son:

$$R_{bx} = 580,42 \text{ N}$$

$$R_{ax} = 688,58 \text{ N}$$

$$R_{by} = 0$$

El momento máximo se dará en la carga superior, es decir, donde está soldada la tapa superior de la turbina, ya que es la fuerza que más alejada está del rodamiento axial. El momento máximo se dará a una distancia de 840 mm respecto del punto A.

Donde el momento en ese punto será:

$$M_x = R_{ax} \cdot 0,84 - F \cdot 0,8$$

$$M_{max} = 70,81 \text{ Nm}$$

-Esfuerzo debido a la tensión de las correas

En la parte superior del eje del rotor, va a ir montado una polea de 500 mm de diámetro, esta además de transmitir el movimiento al generador, va hacer la función de volante de inercia, para amortiguar los cambios de velocidad angular debida al giro de las palas.

Una vez diseñadas las poleas, se decidió colocarlas a una distancia de 950mm. Teniendo en cuenta esta distancia, se calculó el ángulo de abrazo de la rueda motora, es decir, de la polea grande. 204 °.

Se calcula las tensiones de la correa T_1 y T_2 según las siguientes ecuaciones [31]:

$$M_T = (T_2 - T_1)R \quad (2.25)$$

Donde

M_T : Momento torsor de la pala (Nm)

T_2 : Tensión en la correa (N)

T_1 : Tensión en el otro extremo de la correa (N)

R : Radio de la polea (250 m)

Para calcular el momento torsor de la turbina, teniendo en cuenta que el fluido ejerce una fuerza de 1 269 N y un radio de turbina de 0,54 m:

$$M_T = 685,26 \text{ Nm}$$

Por otro lado, la ecuación de relación entre las dos tensiones de la correa:

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\mu_s \beta / \sin(\frac{\alpha}{2})} \quad (2.26)$$

Donde:

μ_s : coeficiente de rozamiento estático (0,4)

β : ángulo de abrazo de la correa en la polea

α : ángulo de la correa (38°)

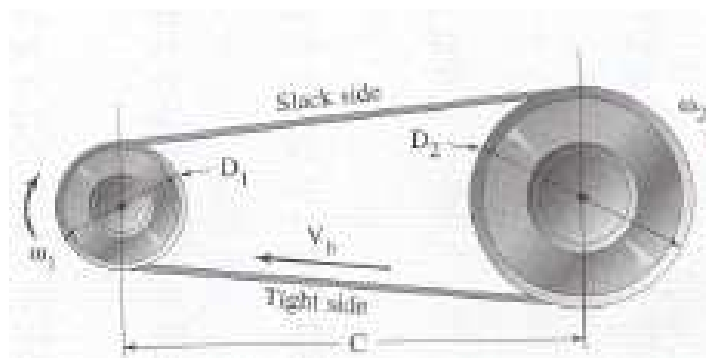


Figura 30. Geometría de las poleas. Fuente [32]

Teniendo en cuenta las dos ecuaciones anteriores, se ha calculado las tensiones T_1 y T_2 :

$$T_1 = 4,23 \text{ N}$$

$$T_2 = 2\,745,27 \text{ N}$$

La fuerza que se manifestará en el eje será la suma de las dos tensiones en la proyección del plano, es decir:

$$F = (T_1 + T_2) \sin \theta \quad (2.27)$$

$$\theta = 12^\circ$$

Fuerza ejercida por la polea $F = 571,65 \text{ N}$

Una vez obtenida la fuerza que ejercerá la correa de la polea, se procede al cálculo de esfuerzo para determinar dónde se va a realizar el momento máximo.



Figura 31. Esquema de fuerzas en eje principal. Fuente: Elaboración propia

Fuerzas resultantes sobre el eje

$$\sum F_y = 0 \quad R_{ay} = 0$$

$$\sum F_x = 0 \quad R_{ax} + R_{bx} = 571,65$$

$$\sum M_a = 0 \quad R_{bx} \cdot 0,962 + 571,65 \cdot 1,18 = 0$$

Las fuerzas en los apoyos son

$$R_{bx} = 701,19 \text{ N}$$

$$R_{ax} = -129,54 \text{ N}$$

$$R_{by} = 0$$

El momento máximo en el eje será en el apoyo b, es decir, donde va situado el rodamiento rígido de bolas y este será de un valor de:

$$M_B = 124,61 \text{ N}$$

Una vez evaluadas las diferentes fuerzas y momentos que van a aparecer en el eje, se calcula el momento máximo del eje. Este momento se va a dar a la altura de la tapa superior de la turbina $x=0,84 \text{ m}$.

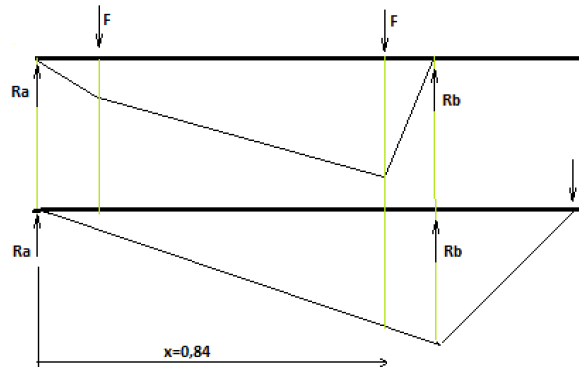


Figura 32. Diagrama de momentos en el eje. Fuente: Elaboración propia

Los momentos máximos en cada diagrama serán, $M=70,81 \text{ Nm}$ y $M=108,81 \text{ Nm}$ respectivamente.

El momento total en ese punto será: $M= 129,82 \text{ Nm}$.

A continuación se comprueba que la barra soporte el momento máximo con la siguiente expresión:

$$\frac{M}{W_{elas}} \leq \frac{\sigma_e}{c.s} \quad (2.28)$$

Donde

M : Momento máximo en el eje (Nm)

W_{elas} : modulo de resistencia del eje (mm^3)

σ_e : límite elástico del acero inoxidable (200 MPa)

$c.s$: coeficiente de seguridad

El módulo elástico para el eje con un diámetro de 30 mm es:

$$W_{elas} = \frac{\pi d^3}{32} = 2,65 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad de 2, el momento anteriormente calculado (129,82 Nm) y el límite elástico del material, se ha obtenido un módulo de resistencia de:

$$W'_{elas} = \frac{M \cdot c \cdot s}{\sigma_e} =$$

$$W'_{elas} = \frac{129,82 \text{ Nm} \cdot 2}{200 \text{ MPa}} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

Como $W_{elas} \geq W'_{elas}$ el eje resistirá la fuerza y momentos que se producirán en él.

2.5.5. Longitud de las correas

En el siguiente apartado se calculará la longitud que deben tener las correas para un correcto funcionamiento. Este cálculo es necesario realizarlo ya que al fabricante se solicitará las correas según longitud.

Para que haya una correcta transmisión del movimiento y la correa no patine se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$D_2 < C < 3(D_1 + D_2) \quad (2.29)$$

Donde:

D_2 : Diámetro de la polea mayor (504 mm)

C : Distancia entre centros de la polea (950 mm)

D_1 : Diámetro de la polea menor (104 mm)

La longitud de la correa se determinará con la siguiente ecuación:

$$L = 2C + 1,57(D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4C} \quad (2.30)$$

La longitud de la correa será de:

$$L = 2,9 \text{ m}$$

2.5.6 Volante de inercia

“Un volante de inercia es un elemento mecánico que sirve aporta inercia adicional al sistema de la turbina” (referencia: wikipedia.volante_de_inercia, 19/02/2016).

Este elemento es el responsable de añadir inercia adicional al rotor de la turbina para conseguir un giro constante y evitar velocidades variables debido a la fuerza que actúa en las palas.

Se ha decidido fabricar una polea con un espesor mayor para que a la vez trabaje como volante de inercia. Para ello, se ha considerado un diámetro exterior de $R_e = 504$ mm el cual corresponde a una polea de esas dimensiones, con un diámetro interior de $R_i = 430$ mm. La polea debería de tener una altura de 45 mm pero como también va a realizar la función de volante de inercia, se le dará un espesor total de 60 mm. Quedando la ranura de la turbina en la parte superior.

Teniendo en cuenta la ecuación del momento de inercia de un cilindro:

$$I = \frac{1}{2}m(R_e^2 - R_i^2) \quad (2.31)$$

La inercia será de $I = 0,221 \text{ kg.m}^2$

Por otro lado se sabe que:

$$I\omega_0 + M_t\theta = I\omega_f \quad (2.32)$$

Donde:

I : momento de inercia

ω_0 : velocidad angular inicial (0 rad/s)

M_t : momento torsor del volante (65,35 Nm)

θ : posición angular

ω_f : velocidad angular final (2,61 rad/s)

Y con las ecuaciones fundamentales del [movimiento]

Se ha llegado a la conclusión que el sistema tardará en estabilizarse 6 min y 25 segundos.

2.5.7 Esfuerzo axial en la estructura

La estructura aunque va apoyada en las paredes de los canales, debido a las fuerzas creadas por las correa de la polea, la barra superior de la estructura

sufrirá una flexión desplazándose lateralmente. Este pandeo se calcula mediante la ecuación de Euler:

$$P = \frac{\pi EI}{4l^2} \quad (2.33)$$

Donde

E : Modulo elástico de la estructura 193 GPa

I : Momento de inercia ($1,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$)

l : longitud de la barra (0,515 m)

$$P = 102,87 \text{ KN}$$

Como se puede comprobar, está fuerza es mayor que la fuerza creada por las correas de la polea ($F = 571,65 \text{ N}$) por lo que la estructura cumple los requisitos de rigidez y no flectará.

2.5.8 Tecnología de soldadura

El proceso de soldadura se utilizará para garantizar la unión rígida entre los alabes y las tapas de la turbina. Para ello se utilizara el proceso de soldadura manual con arco eléctrico y electrodo revestido (SMAW), el equipo utilizado será un rectificador de corriente trifásico con polaridad invertida para garantizar la penetración de la soldadura.

Los parámetros de soldadura son los siguientes

- corriente de soldadura entre 120-160
- tensión del arco 20-25 V
- velocidad de soldadura en dependencia de la habilidad del operario.

Se efectuara el cordón de soldadura en una sola pasada por cada cara del alabe. El electrodo seleccionado es del tipo E 308L, nombre común 18/8, para garantizar la resistencia a la corrosión intergranular, por la norma AWS con la siguiente composición química: C 0,04%, Cr 19,5%, Ni 10,5%, Mn 2,5%, Si 0,9%. El diámetro del electrodo será de 2 mm.

Como segunda elección para el electrodo es E 347.

Este mismo proceso se realizará para soldar la estructura de la turbina, teniendo en cuenta que también será del mismo material que la turbina, acero inoxidable (AISI 304).

2.5.9 Análisis y selección de rodamientos

La función principal de los rodamientos es todo el peso de los componentes de la turbina y por otro lado las fuerzas que vayan a ser generadas por el fluido impidiendo que no se produzca mucha flexión en el eje principal. Gracias a los rodamientos, se consigue tener el eje principal de la turbina en voladizo.

La turbina va a tener dos rodamientos, uno en la parte inferior del eje y otro en la parte superior. Los rodamientos irán unidos a la estructura de la turbina mediante el porta-rodamientos.

El rodamiento que se va a colocar en la parte inferior, se va a utilizar uno de tipo axial que sea capaz de soportar todo el peso de la turbina hidrocínética (el conjunto completo). Esto será un peso aproximado de 52,8 kg, es decir 528 N. Por ello se ha seleccionado un rodamiento *SKF-51206* con dimensiones, 30 mm diámetro interior, 47 mm diámetro exterior y un espesor de 11 mm.

Con estas dimensiones se consigue que el eje quede apoyado en el porta rodamientos quedando así fijo en la estructura de la turbina.

En la unión superior, se va a colocar un rodamiento rígido de bolas capaz de soportar la fuerza ejercida por el fluido. Dicha fuerza es de 1269 N. Para ello se colocará un rodamiento *SKF-6206-2Z* alojado en el porta rodamiento el cual también estará amarrado a la estructura de la turbina. Este rodamiento tendrá un diámetro interior de 30 mm, diámetro exterior de 55 mm y un espesor de 16 mm.

En el soporte intermedio donde va ir montada la polea doble, también irán colocados dos rodamientos. En la parte inferior se colocará un rodamiento cónico *SKF-30205* de diámetro interior 25 mm, diámetro exterior 52 mm y una anchura de 15 mm. Se ha decidido colocar un rodamiento cónico para que soporte tanto el peso de las poleas, 20,13 kg (201,3 N) como las fuerzas radiales que aparecerán debido a las tensiones de las correas.

En la parte superior se colocará un rodamiento rígido de bolas *SKF6206-2Z* con un diámetro interior de 30 mm un diámetro exterior de 62 mm y una anchura de 16 mm. Este será el mismo rodamiento que irá colocado en la parte superior del eje de la turbina hidrocínética.

Resistencia y vida útil de los rodamientos

Se realiza la comprobación de rodamientos para el eje vertical del rotor, para ello se debe hacer el cálculo de capacidad de carga estática y dinámica.

El eje vertical tendrá la fuerza del fluido dividida en dos fuerzas (donde van soldadas las tapas) y una fuerza puntual debido a las tensiones de la correa de las poleas. Como estas fuerzas están en planos diferentes, se hará la suma tangencial en los puntos de apoyo. Anteriormente se han calculado las fuerzas resultantes en los apoyos:

Suma tangencial:

$$R_{bx} = 910,25\text{N}$$

$$R_{ax} = 700,67\text{ N}$$

$$R_{by} = 0$$

En el eje y aparecerá una fuerza debido al peso, por lo que $F_{\text{peso}} = 528\text{ N}$.

-Para el cálculo del rodamiento axial SKF-51206 :

$$\text{C. Estática } P_a = 1 \cdot R_{ax} + 0,52 \cdot F_{\text{peso}} = 975,23\text{ N}$$

C. Dinámica

$$\frac{F_{\text{peso}}}{R_{ax}} < 1,44$$

$$0,75 < 1,44$$

$$P_a = 1 \cdot R_{ax} + 0,55 F_{\text{peso}} = 991,07\text{N}$$

-Para el cálculo del rodamiento radia SKF-6206-2Z :

$$\text{C. Estática } P_a = 0,6 \cdot R_{bx} + 0,5 \cdot F = 413,15\text{ N}$$

C. Dinámico

$$\frac{F_{yb}}{R_{bx}} \leq e$$

$$P_b = 1R_{bx} + 0F_{yb} = 910,25 \text{ N}$$

-Vida útil de los rodamientos

La capacidad de carga estática necesaria C_0 de un rodamiento se calcula como:

$$C_0 = S_0 \cdot P_0$$

Los rodamientos realizarán un movimiento lento debido a la rotación por lo que se estima que $S_0=1,6$. Calculada anteriormente la carga estática de cada rodamiento,

Para el rodamiento axial:

$$C_0 = 1,6 \cdot 975,23 \text{ N} = 1560,37 \text{ N} < 10\,000 \text{ N}$$

Para el rodamiento radial:

$$C_0 = 1,6 \cdot 413,15 \text{ N} = 661,04 \text{ N} < 37\,500 \text{ N}$$

Por lo que los dos rodamientos aguantarán a carga estática.

Para calcular la carga dinámica:

La relación de cojinetes con contacto de rodadura tiene una relación:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^K \quad (2.34)$$

Donde:

$K= 3.0$ rodamiento de bolas

$K=10/3$ para rodamiento de rodillos

La capacidad de carga dinámica se calcula

$$C = Pd \left(\frac{h \cdot rpm \cdot 60}{10^6} \right)^{1/k} \quad (2.35)$$

Donde:

C : capacidad de carga (N)

Pd : carga dinámica del diseño

h : vida útil para rodamientos. (Figura 33)

rpm: velocidad de giro rpm.

Vida útil de diseño recomendada para rodamientos	
Uso	Vida útil de diseño L_{10} , h
Aparatos domésticos	1.000-2.000
Motores para aviones	1.000-4.000
Automotriz	1.500-5.000
Equipo agrícola	3.000-6.000
Elevadores, ventiladores industriales, engrantes de uso múltiple	8.000-15.000
Motores eléctricos, ventiladores industriales con tolva, máquinas industriales en general	20.000-30.000
Bombas y compresores	40.000-60.000
Equipo crítico en operación continua las 24 horas	100.000-200.000

Figura 33. Duración de vida útil recomendable de rodamientos. Fuente: Joseph Shigley “Diseño en ingeniería mecánica”

Para el rodamiento axial

$$C = 413,15 \left(\frac{200000 \cdot 25 \cdot 60}{10^6} \right)^{1/3}$$

$$C = 2765,76 \text{ N} < 12\,600 \text{ N}$$

Rodamiento radial

$$C = 910,25 \text{ N} \left(\frac{200000 \cdot 25 \cdot 60}{10^6} \right)^{1/3}$$

$$C = 6093,51 \text{ N} < 15\,000 \text{ N}$$

Se han realizado los mismos cálculos para los otros dos rodamientos que irán montados en el eje de la polea doble. Se puede concluir que tanto estos rodamientos como los anteriormente calculados van a soportar la carga estática y dinámica durante una vida de aproximadamente 200 000 horas.

2.5.10 Diseño de las chavetas

La chaveta es una pieza desmontable que se instala en la comunicación entre eje y la polea con el fin de transmitir el giro y por lo tanto el momento. La chaveta, por

lo general, queda la mitad dentro de cada pieza. Para ello, se debe mecanizar una ranura axial en el eje y polea, esto es un chavetero. Las chavetas deben montarse en el eje antes de montar la polea.

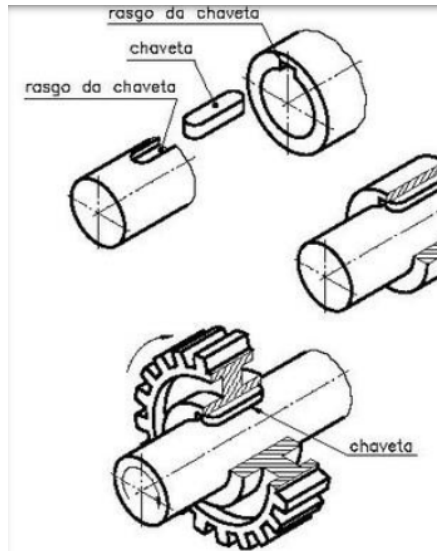


Figura 34. Transmisión del momento de chaveta. Fuente [19].

El dimensionamiento de las chavetas se ha realizado mediante la normativa vigente con sus respectivos ajustes. Estas dimensiones se pueden apreciar en los planos de diseño en el anexo III, tanto en los planos de los ejes (01.001.002 y 01.002.003) y en los planos de las poleas (01.001.004 y 01.002.004)

2.6. Mantenimiento

En este apartado se determinará el mantenimiento que debe tener la turbina hidrocinética para un correcto funcionamiento. Cabe recordar que se ha realizado un rotor el con fabricación y montaje lo más sencillos posibles para evitar reparaciones con mucha dificultad.

2.6.1 Mantenimiento preventivo

La turbina hidrocinética se ha diseñado de tal forma que la mayoría de los elemento puedan ser elementos comerciales, como son rodamientos, tuerca, pasadores...

- Una vez instalado la turbina, a los pocos meses se debe realizar el apriete y comprobación de tuercas, tornillos, pasadores... para mejorar el asentamiento de estos elementos una vez que han sido expuestos a

las diferentes fuerzas. Tanto estos elementos como los engrases se deben realizar comprobaciones frecuentemente.

- Periódicamente, se debe realizar un mayor mantenimiento, donde se debe comprobar el buen funcionamiento de los rodamientos, ejes, generador, poleas... Teniendo en cuenta que la turbina va estar expuesta a la corrosión ya que parte de ella estará sumergida en el canal.

2.6.2 Mantenimiento correctivo

Una vez que se ha producido el fallo en el sistema, se realiza este tipo de mantenimiento. Por lo que se debe realizar un buen mantenimiento preventivo para conseguir no tener que realizar este otro tipo. Aunque se tenga un buen control del preventivo, siempre cabe la posibilidad de que el sistema falle, debido a piezas defectuosas (no se puedan ver a simple vista) o debido a las condiciones externas.

2.6.3 Mantenimiento predictivo

Al tratarse de un diseño sencillo no se va a llevar a cabo un mantenimiento predictivo, ya que la reparación de las piezas en caso de fallo será rápida y por tanto con los dos mantenimientos descritos anteriormente será suficiente.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Valoración del diseño

Finalmente se diseñará una turbina hidrocínética tipo Savonius ya que es una turbina que se caracteriza por su inocua tecnología, simplicidad de diseño, montaje y posterior mantenimiento. Para garantizar un buen funcionamiento de este tipo de turbinas tampoco es necesario un salto de agua ni un gran caudal, con una velocidad del fluido no muy elevada (entre 0,8 y 2,3 m/s) es capaz de funcionar.

Se han utilizado materiales de los cuales son fáciles de conseguir, como es el acero inoxidable, para todas las piezas que van a estar sumergidas en el agua; hierro fundido para fabricar las poleas de transmisión del movimiento ya que estas se van a fabricar mediante fundición y un acero común para aquellas que se van a fabricar mediante arranque de material.

Se ha realizado un diseño de forma que se puedan utilizar la mayor parte de los componentes comerciales, así podrá ser más fácil adquirir los elementos, como son rodamientos, tornillos, arandelas... con la ventaja de que en el mercado tienden a ser más baratos que fabricarlos por uno mismo.

3.2. Impacto económico del resultado

Habitualmente cuando se desarrolla un proyecto, es importante valorar algunos aspectos como el tipo económico-social que puede suponer. En este acápite se hace referencia al análisis económico en lo referente al costo de la fabricación para el diseño y fabricación del sistema.

A la hora de hacer la valoración económica se debería realizar un análisis de la influencia de los costos directos e indirectos que intervienen en la posterior fabricación de los elementos y de los precios de venta en el mercado nacional de los elementos normalizados.

Costos directos de producción:

- Materiales y materias primas (MMP).

- Combustible y energía (E).
- Salario básico (SB).
- Seguridad social (SS).
- Salario complementario (SC).
- Costos indirectos de la producción:
- Costo de transporte.
- Gasto de trabajo científico e investigativo (GTCl).
- Gastos adicionales del taller.
- Otros gastos complementarios

Este cálculo se ordena según las siguientes tablas y expresiones.

Tabla 3.1 Partidas de costos directos de producción, materiales y materias primas (MMP).

Accesorios y materiales	Consumo (unidades)	Costo unitario (CUP)	Costo Total
Total			

Tabla 3.2. Partidas de costo directo de producción, energía (E).

Operación	Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (horas)	Costo de electricidad (CUP)
Total				

Nota: El precio de 1 kWh de electricidad es de 1,20 CUP según tarifa de la UE

Tabla 3.3. Partidas de costos directos de producción, salario básico (SB).

Labor	Salario horario	Tiempo de labor	Costo
Total			

El salario complementario (SC) se computa como el 9.09 % del salario básico:

SC =

El gasto por seguridad social (SS) representa el 8% dela suma del salario básico y el complementario:

SS =

El costo directo total de producción (CDTP) es:

$CDTP = MMP + E + SB + SC + SS$

Costos indirectos de producción

Tabla 3.4. Partidas de costos indirectos de producción (PCI).

Partidas de costo	Coeficiente	Costo de la partida
Transporte (Materiales y Materias Primas)	$0.052 \times MMP$	
Gasto adicional del taller (Salario Básico)	$0.0830 \times SB$	
Gastos de Trabajo científico Investigativo (Salario Básico)	$0.060 \times SB$	
Gastos Complementarios (Salario Básico)	$0.006 \times SB$	
Gasto Total		

Calculando el costo total CT de fabricación del equipo se obtiene:

$$CT = CTD + CI$$

3.3. Impacto ambiental

La energía que se obtiene como resultado del aprovechamiento de la energía hidrocínética que llevará el agua del canal se considerará energía “limpia”. No obstante en las condiciones actuales, siempre aparece algún impacto como resultado de la actividad que ha realizado el hombre. Esto principalmente es debido a las tecnologías que se han utilizado en la fabricación de los elementos así como en la instalación del proyecto. Puede entonces asegurarse que el proyecto se ejecutara con mínimo impacto negativo sobre el medio.

CONCLUSIONES

- En el proceso de generación de electricidad en hidroeléctricas, la energía hidrocínética es considerada como una alternativa viable, aprovechando la velocidad que lleva el agua (en este caso de ríos y canales) para poder generar electricidad.
- Es posible aprovechar la energía hidrocínética para generar energía eléctrica en la provincia de Pinar del Río.
- Se logró un diseño de una turbina hidrocínética tipo Savonius que cumple con los requerimientos técnicos y de operación necesarios para su operación y mantenimiento, teniendo en cuenta la facilidad de instalación y fabricación, así como el bajo coste.

RECOMENDACIONES

- Validar en la práctica la turbina hidrocínética tipo Savonius diseñada, a partir de su fabricación e instalación, para comprobar su contribución a potenciar una mayor generación de electricidad en la provincia Pinar del Río.
- Valorar en otros canales o ríos con características similares la posibilidad de instalación de la turbina hidrocínética tipo Savonius diseñada, dado la pertinencia ecológica y económica.
- Socializar los resultados obtenidos en la investigación en eventos y publicaciones.
- Continuar investigaciones que permitan potenciar una mayor generación de electricidad a partir de la hidrocínética, profundizando en el perfeccionamiento de estas turbinas, para incrementar la fuerza y velocidad del agua, lo que incluye utilizar otros tipos que aumenten la eficiencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. L. Radkey and B. D. Hibbs, "Definition of Cost Effective River Turbine Designs, Tech.," Rep. AV-FR-81/595 (DE82010972), Report for US Department of Energy, Aerovironment Inc., Pasadena, California, December 1981.
- [2] M. Khan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "Dynamics of a vertical axis hydrokinetic energy conversion system with a rectifier coupled multi-pole permanent magnet generator," Vols. Vol. 4, , no. Iss. 2, pp. 116–127, 2010.
- [3] J. Khan, "State of River Energy Technology," Powertech Labs, British Columbia, Canada, 2006..
- [4] M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assesment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal aplications.," *Applied Energy*, vol. 86, p. 1823–1835, 2009.
- [5] M. Liu, "Hydrokinetic turbine power converter and controller system design and implementation," University of British Columbia, Vancouver, Canada, Agosto, 2014.
- [6] Verdant Power Canada ULC., Technology Evaluation of Existing and Emerging Technologies, "Water Current Turbines for River Applications, Tech. Rep.," Natural Resources Canada, NRCan-06-01071, Canada, June 2006.
- [7] M. Khan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, p. 2177–2193, 2008.
- [8] A. Gorlov, "Tidal Energy," Boston Massachusetts, USA, Academic Press, 2001, pp. 2955-2960.
- [9] S. Kassam, "In-situ testing of a Darrieus hydrokinetic turbine in cold climates," Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Winnipeg, Canada, 2009.
- [10] S. L. Ortega-Achury, W. H. McAnally and T. E. Davis, "Hydrokinetic Power Review," Mississippi State, USA, Abril, 2010.
- [11] M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," 43 (2015) 72–82, Noviembre 2014. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/rser. [Accessed Octubre 2015].
- [12] A. Bahaj and L. Myers, "Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production," Vols. Vol. 28, 2205-2211, 2003.
- [13] R. Charlier, "A "Sleeper " awakes: tidal current power," Vols. Vol. 7, , no. No. 6, pp 515-529, 2003.

- [14] W. contributors, Wikipedia, The Free Encyclopedia., September 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rance_Tidal_Power_Station. [Accessed 11 octubre 2015].
- [15] F. Miguelez, Los otros usos del mar, España: NetBiblio, 2010.
- [16] W. contributors, Wikipedia, The Free Encyclopedia, September 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tidal_power_stations. [Accessed 12 octubre 2015].
- [17] K. I. Limited, "power-technology.com," 2015. [Online]. Available: <http://www.power-technology.com/features/featuretidal-giants---the-worlds-five-biggest-tidal-power-plants-4211218/>. [Accessed 12 octubre 2015].
- [18] M. P. Davianna, "Cálculo de un rodete de flujo cruzado tipo Darrieus con tres paletas rectas y perfiles curvos asimétricos," Universidad Central de Venezuela en opción al título de Ingeniero, Caracaz, Venezuela, 2013.
- [19] P. Garman, ""Water current turbines: Providing pumping, power in remote areas,"," *Hydro Review Worldwide*, vol. 6, pp. 24-28, 1998.
- [20] T. Aditya Rachman, "Pontoon, an alternative flexible cheap mounting option for the renewable decentralized river current turbine power service," October 2015.
- [21] G. L. Tiago, "The state of art of Hydrokinetic power in Brazil," in *WaterPowerXIII*, New York, USA, 2003.
- [22] P. UNCuyo, Jornada S.A., 30 Marzo 2014. [Online]. Available: <http://jornadaonline.com/Mendoza/111395-La-UNCuyo-cre%C3%B3-una-turbina-para-generar-energ%C3%ADa-del-R%C3%ADo-Mendoza>. [Accessed 5 Noviembre 2015].
- [23] S. Gregory, "Alternative Hydro Solutions," Abril 2015. [Online]. Available: <http://www.althydrosolutions.com/homeEsp.html>. [Accessed 3 Octubre 2015].
- [24] post, "posts.es," Posts 2015., 26 Diciembre 2008. [Online]. Available: <http://posts.es/ecologia/se-instala-la-primer-turbina-hidrocinetica-comercial-de-los-estados-unidos/>. [Accessed 23 Agosto 2015].
- [25] V. E. Peña, "Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos," Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura, Tesis de Grado, Piura, Perú, junio 2013.
- [26] T. Hall, "Numerical Simulation of a Cross Flow Marine Hydrokinetic Turbine," Northwest National Marine Renewable Energy Center, Washintong, 2012.
- [27] M. Vermaak, K. Kusakana and S. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: a review of literature," *Renew Sustain*

Energy Rev, no. 29, pp. 625-633, 2014.

- [28] A. Verma and S. R.P., "Efficiency measurement techniques of hidrokinetic turbines: A review," in *International Conference on Hydropower for Sustainable Development*, Dehradun, India, february 2015.
- [29] S. Subhra M., "Design and critical performance evaluation of horizontal axis hydrokinetic turbines," Missouri University of Science and Technology, Missouri, EUA, 2010.
- [30] M. Villarrubia, *Energía Eólica*, Barcelona, España: CEAC, 2004.
- [31] L. Pareto, *Formulario de mecánica*, Barcelona: Ceac, 1980.
- [32] D. H. Myszka, *machines and mechanisms*, columbus, Ohio, 1999.
- [33] D. Dixon, "Assessment of Waterpower Potential and Development Needs, Tech," Rep. 1014762, Electric Power Research Institute (EPRI), March 2007..
- [34] A. K. Verma, N. Garg and T. S. Rajput, "Efficiency Improvement Techniques of Hydrokinetic Turbines:A review," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. Volume 5, no. ISSN 2250-2459, Issue 6, , pp. 144-151, June 2015.
- [35] Ocean Renewable Power Company (ORPC), "Generación eléctrica limpia y predecible para redes y comunidades costeras," www.orpc.co, Portland, EUA, 2013.
- [36] "Tablas y Diagramas, Ingeniería Fluidomecánica," 2000.
- [37] J. López, R. Silva and E. G. Mendoza, "Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el Hidrogenerador IMPULSA," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. vol. II, no. núm. 4, pp. 97-110, octubre-diciembre de 2011.
- [38] A. Rachman, "Pontoon, an alternative flexible cheap," October 2015.
- [39] W. T. Twidell J, "Renewable energy resources.," 2006.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. A. Crespo "Mecánica de fluidos", Thomson Editores, Universidad Politécnica de Madrid, 2006
- [2]. Bahaj and L. Myers, "Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production," Vols. Vol. 28, 2205-2211, 2003.
- [3]. C. J. Renedo, "Turbinas Hidráulicas," Universidad de Cantabria, Cantabria España, 2010.
- [4]. Comisión Europea, Dirección General de energías, "Manual de pequeña hidráulica" Bruselas, Bélgica, 1998.
- [5]. Coordinación de Energías Renovables, "Los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos," in *Energías Renovables 2008 - Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos*, República Argentina - Conmutador, Secretaría de Energía, 2009, pp. 9-14.
- [6]. D. Dixon, "Assessment of Waterpower Potential and Development Needs, Tech," Rep. 1014762, Electric Power Research Institute (EPRI), March 2007.
- [7]. D. H. Myszka, machines and mechanisms, columbus, Ohio, 1999.
- [8]. ESHA. Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. 2009
- [9]. F. M. White "Mecánica de Fluidos", , McGraw-Hill, 2008
- [10]. F. Miguelez, Los otros usos del mar, España: NetBiblio, 2010.
- [11]. G. L. Tiago, "The state of art of Hydrokinetic power in Brazil," in *WaterPowerXIII*, New York, USA, 2003.
- [12]. García Ortega . "Clasificación y descripción de Máquinas Hidráulicas." Universidad Pública de Navarra, España
- [13]. Gorlov, "Tidal Energy," Boston Massachusetts, USA, Academic Press, 2001, pp. 2955-2960.
- [14]. J. Khan, "State of River Energy Technology," Powertech Labs, British Columbia, Canada, 2006.
- [15]. J. López, R. Silva and E. G. Mendoza, "Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el Hidrogenerador IMPULSA," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. vol. II, no. núm. 4, pp. 97-110, octubre-diciembre de 2011.
- [16]. K. I. Limited, "power-technology.com," 2015. [Online]. Available: <http://www.power-technology.com/features/featuretidal-giants---the-worlds-five-biggest-tidal-power-plants-4211218/>. [Accessed 12 octubre 2015].
- [17]. K. Verma and S. R.P., "Efficiency measurement techniques of hidrokinetic turbines: A review," in *International Conference on*

Hydropower for Sustainable Development , Dehradun, India, february 2015.

- [18]. K. Verma, N. Garg and T. S. Rajput, "Efficiency Improvement Techniques of Hydrokinetic Turbines:A review," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. Volume 5, no. ISSN 2250-2459, Issue 6, , pp. 144-151, June 2015.
- [19]. L. Pareto, *Formulario de mecánica*, Barcelona: Ceac, 1980.
- [20]. M. Franquesa, "Funcionamiento y rendimiento de una turbina eólica" *Introducción a la teoría de las turbinas Eólicas*, Berlin 1989.
- [21]. M. Khan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, p. 2177–2193, 2008.
- [22]. M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assesment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal aplications.," *Applied Energy*, vol. 86, p. 1823–1835, 2009.
- [23]. M. Khan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "Dynamics of a vertical axis hydrokinetic energy conversion system with a rectifier coupled multi-pole permanent magnet generator," *Vols. Vol. 4, , no. Iss. 2*, pp. 116–127, 2010.
- [24]. M. Liu, "Hydrokinetic turbine power converter and controller system design and implementation," *University of British Columbia, Vancouver, Canada*, Agosto, 2014.
- [25]. M. P. Davianna, "Cálculo de un rodete de flujo cruzado tipo Darrieus con tres paletas rectas y perfiles curvos asimétricos," *Universidad Central de Venezuela en opción al título de Ingeniero, Caracaz, Venezuela*, 2013.
- [26]. M. Vermaak, K. Kusakana and S. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: a review of literature," *Renew Sustain Energy Rev*, no. 29, pp. 625-633, 2014.
- [27]. M. Villarrubia, *Energía Eólica*, Barcelona, España: CEAC, 2004.
- [28]. M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," 43 (2015) 72–82, Noviembre 2014. [Online]. www.elsevier.com/locate/rser. [Accessed Octubre 2015].
- [29]. *Manual mini y microcentrales hidraulicas*. ITDG Perú 1995
- [30]. Ocean Renewable Power Company (ORPC), "Generación eléctrica limpia y predecible para redes y comunidades costeras," www.orpc.co, Portland, EUA, 2013.
- [31]. P. Garman, "Water current turbines: Providing pumping, power in remote areas", *Hydro Review Worldwide*, vol. 6, pp. 24-28, 1998.
- [32]. Post, "posts.es," Posts 2015., 26 Diciembre 2008. [Online]. Available: <http://posts.es/ecologia/se-instala-la-primer-turbina->

- hidrocinetica-comercial-de-los-estados-unidos/. [Accessed 23 Agosto 2015].
- [33]. P. UNCuyo, Jornada S.A., 30 Marzo 2014. [Online]. Available: <http://jornadaonline.com/Mendoza/111395-La-UNCuyo-cre%C3%B3-una-turbina-para-generar-energ%C3%ADa-del-R%C3%ADo-Mendoza>. [Accessed 5 Noviembre 2015].
- [34]. R. Charlier, "A "Sleeper " awakes: tidal current power," Vols. Vol. 7, No. 6, pp 515-529, 2003.
- [35]. R. L. Radkey and B. D. Hibbs, "Definition of Cost Effective River Turbine Designs, Tech.," Rep. AV-FR-81/595 (DE82010972), Report for US Department of Energy, Aerovironment Inc., Pasadena, California, December 1981.
- [36]. Rachman, "Pontoon, an alternative flexible cheap," October 2015.
- [37]. SKF "Rodamientos y sistemas de lubricación SKF" www.skf.com
- [38]. S. Gregory, "Alternative Hydro Solutions," Abril 2015. [Online]. Available: <http://www.althydrosolutions.com/homeEsp.html>. [Accessed 3 Octubre 2015].
- [39]. S. L. Ortega-Achury, W. H. McAnally and T. E. Davis, "Hydrokinetic Power Review," Mississippi State, USA, Abril, 2010.
- [40]. S. Kassam, "In-situ testing of a Darrieus hydrokinetic turbine in cold climates," Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Winnipeg, Canada, 2009.
- [41]. S. Subhra M., "Design and critical performance evaluation of horizontal axis hydrokinetic turbines," Missouri University of Science and Technology, Missouri, EUA, 2010.
- [42]. "Tablas y Diagramas, Ingeniería Fluidomecánica," 2000.
- [43]. T. Aditya Rachman, "Pontoon, an alternative flexible cheap mounting option for the renewable decentralized river current turbine power service," October 2015.
- [44]. T. Hall, "Numerical Simulation of a Cross Flow Marine Hydrokinetic Turbine", Northwest National Marine Renewable Energy Center, Washington, 2012.
- [45]. V. E. Peña, "Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos," Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura, Tesis de Grado, Piura, Perú, junio 2013.
- [46]. Verdant Power Canada ULC., Technology Evaluation of Existing and Emerging Technologies, "Water Current Turbines for River Applications, Tech. Rep.," Natural Resources Canada, NRCan-06-01071, Canada, June 2006.
- [47]. W. contributors, Wikipedia, The Free Encyclopedia., September 2015. [Online]. https://en.wikipedia.org/wiki/Rance_Tidal_Power_Station. [Accessed 11 octubre 2015].

- [48]. W. contributors, Wikipedia, The Free Encyclopedia, September 2015. [Online].https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tidal_power_stations. [Accessed 12 octobre 2015].
- [49]. W. T. Twidell J, "Renewable energy resources.," 2006.

ANEXOS

ANEXO I: ANÁLISIS DE ESFUERZO DE LAS PALAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar el cálculo de las palas, se ha determinado un espesor de pala de 2mm, se ha realizado el diseño con el programa 3D Solidworks, y con la herramienta de análisis *simulationXpress* se ha precedido al cálculo de esfuerzos a la que va a ser sometida la turbina.

Anteriormente en el capítulo II se han calculado las dos fuerzas a las que va a estar sometida, es decir, se han calculado el valor de la fuerza que va ejercer el fluido contra las palas y la fuerza centrífuga debido al giro del rotor.

Pasos a seguir en el análisis de esfuerzos

- Se determina la sujeción que va a tener, y qué tipo. La turbina se va a montar en dos rodamientos, los cuales van a estar en la estructura. El eje del rotor se va a comportar como una viga bi-apoyada.
- Determinación de las cargas. En este apartado se debe meter el valor de las cargas y especificar sobre qué caras se debe aplicar (en este caso las palas) y dirección del fluido. Teniendo en cuenta que la fuerza que ejerce el fluido es mucho mayor que la fuerza centrífuga, para simplificar los cálculos, solo se ha aplicado esta primera fuerza.
- Se especifica el material, en este caso *AISI 304*
- Se realiza el cálculo de ejecución, con el mallado especificado por el propio programa.
- El programa realiza una simulación de cómo se movería la turbina debido a las fuerzas. En caso de estar conforme, se le da a crear informe. En caso contrario, se debe volver a especificar las fuerzas o apoyos hasta conseguir el resultado deseado. Para crear el informe, se debe meter el coeficiente de seguridad que se desea, en este caso 1,5.
- El programa genera un informe, el cual se va a resumir a continuación.

Resumen de informe de los resultados

- Primero describe las propiedades del material, para un *AISI 304*:

Nombre del material: AISI 304

Tipo de material: Isotrópico elástico lineal

Límite elástico: $2,06 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción $5,17 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

- Posteriormente especifica tipo de mallado:

- *Tabla Anexo II: mallado*

- N° total de nodos	- 61844
- N° total de elementos	- 30862
- Coeficiente máximo de aspecto	- 217,18

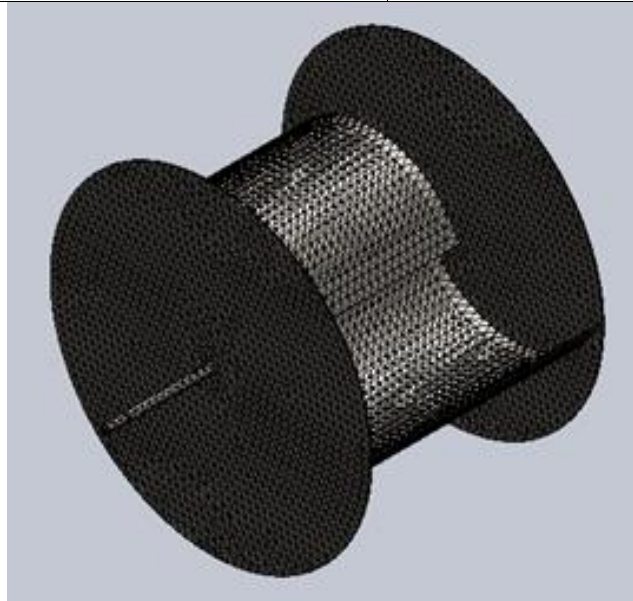


Figura anexo I.1: Mallado de la turbina. Elaboración propia

-Por último se especifica el desplazamiento y el análisis de Von-Misses.

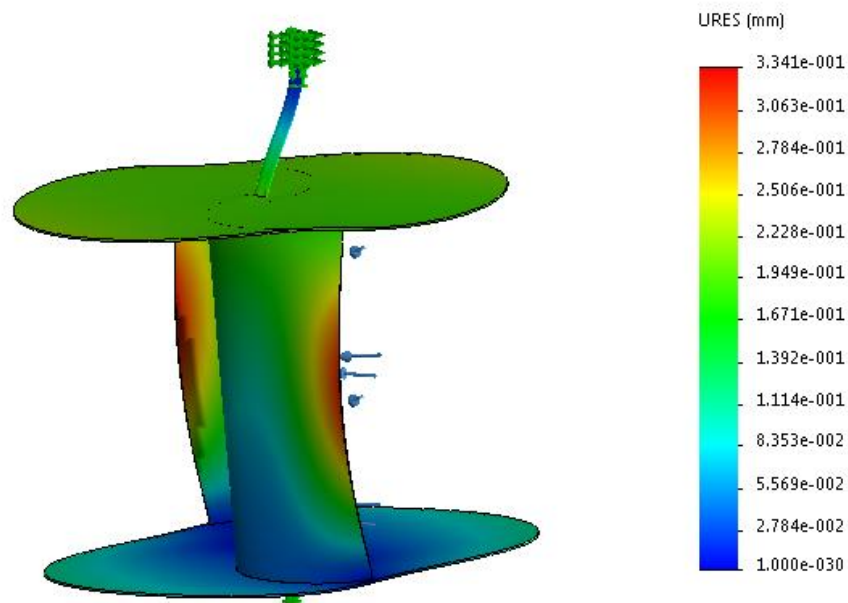


Figura anexo I.2. *Análisis de deformaciones. Elaboración propia*

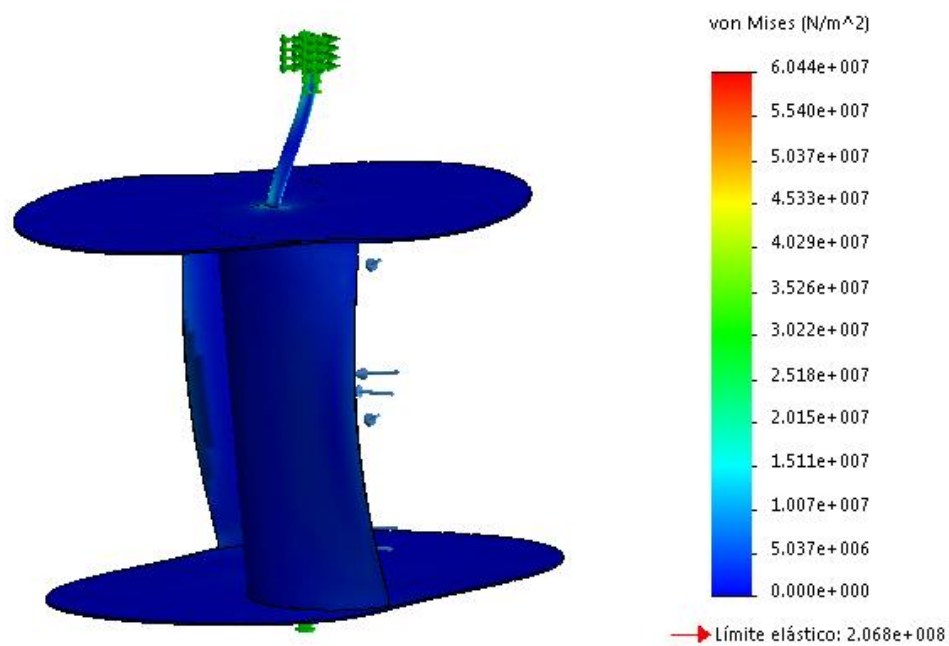
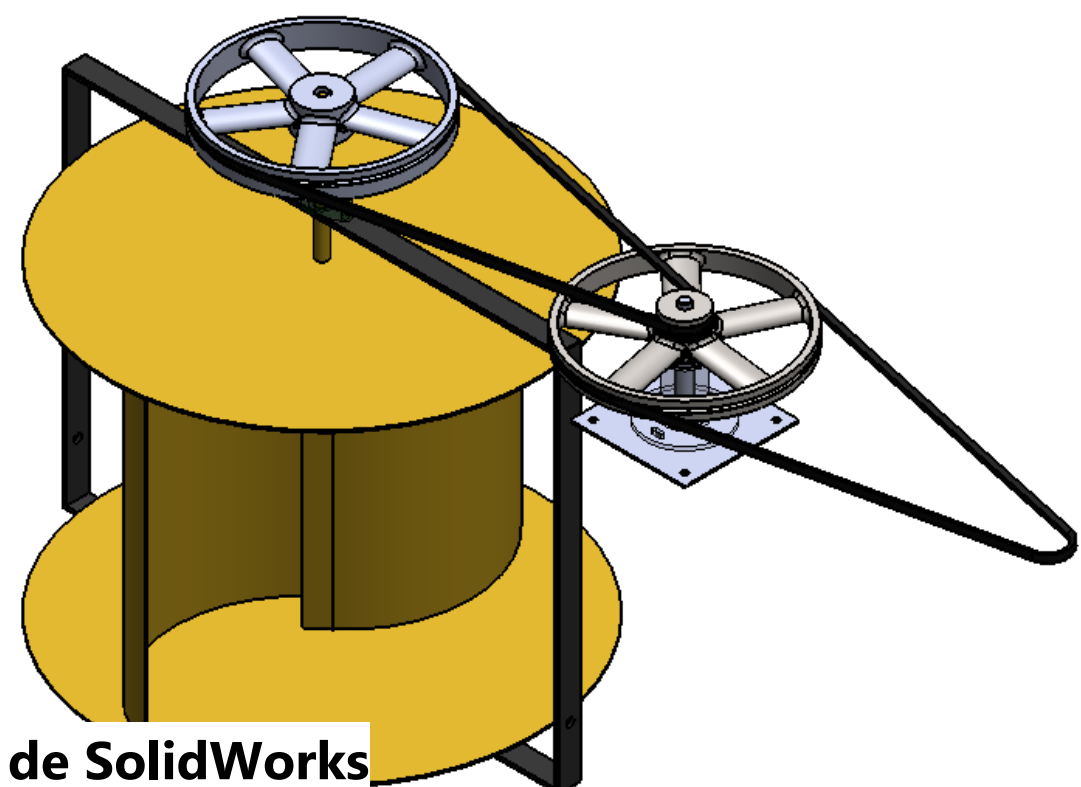
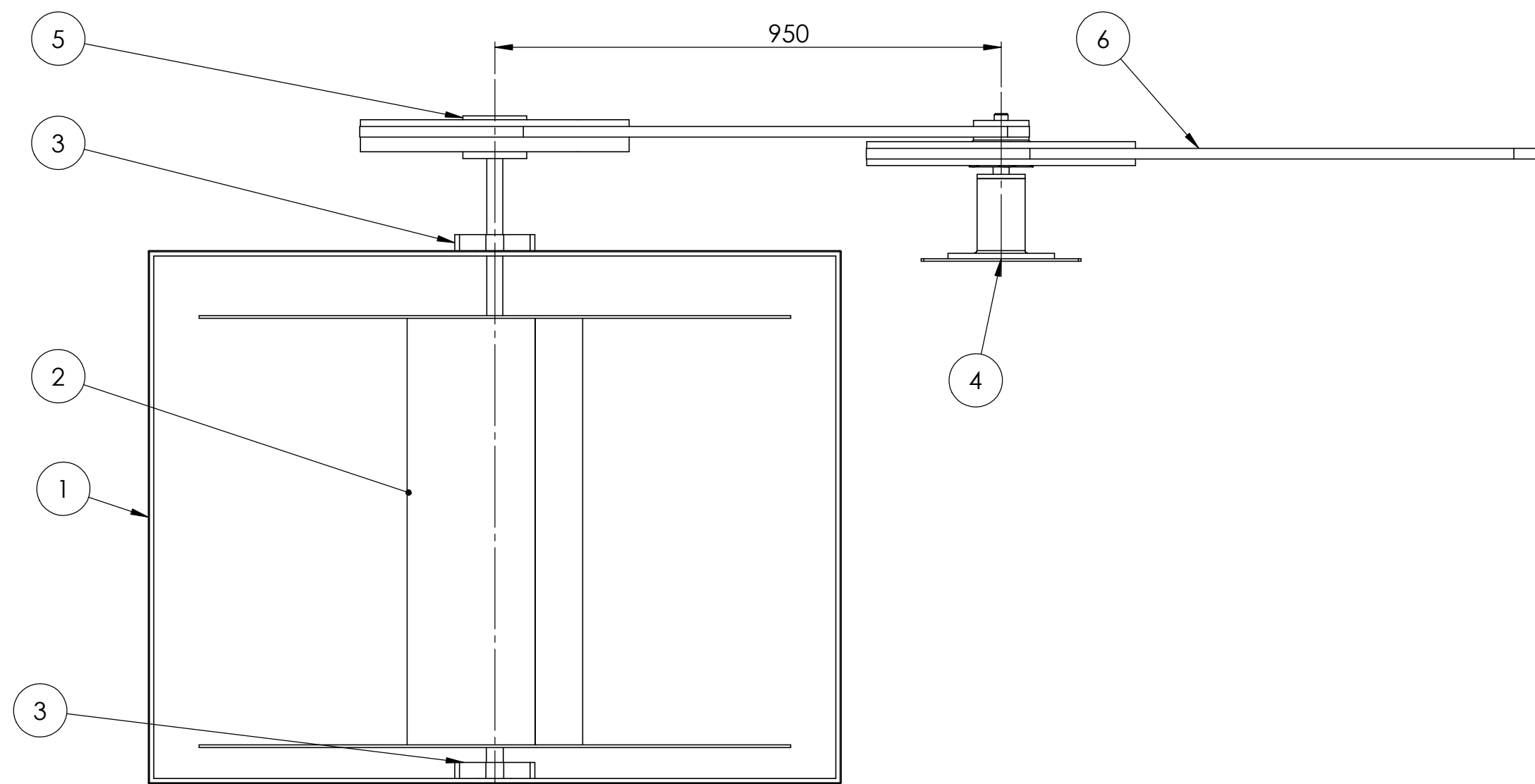


Figura anexo I.3 *Análisis de Von-Misse. Fuente: Elaboración propia*

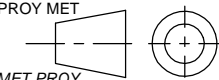
Como conclusión se puede apreciar que en el análisis de desplazamiento, (Figura Anexo I.2) este se hará máximo en la mitad de la pala y lo más alejado

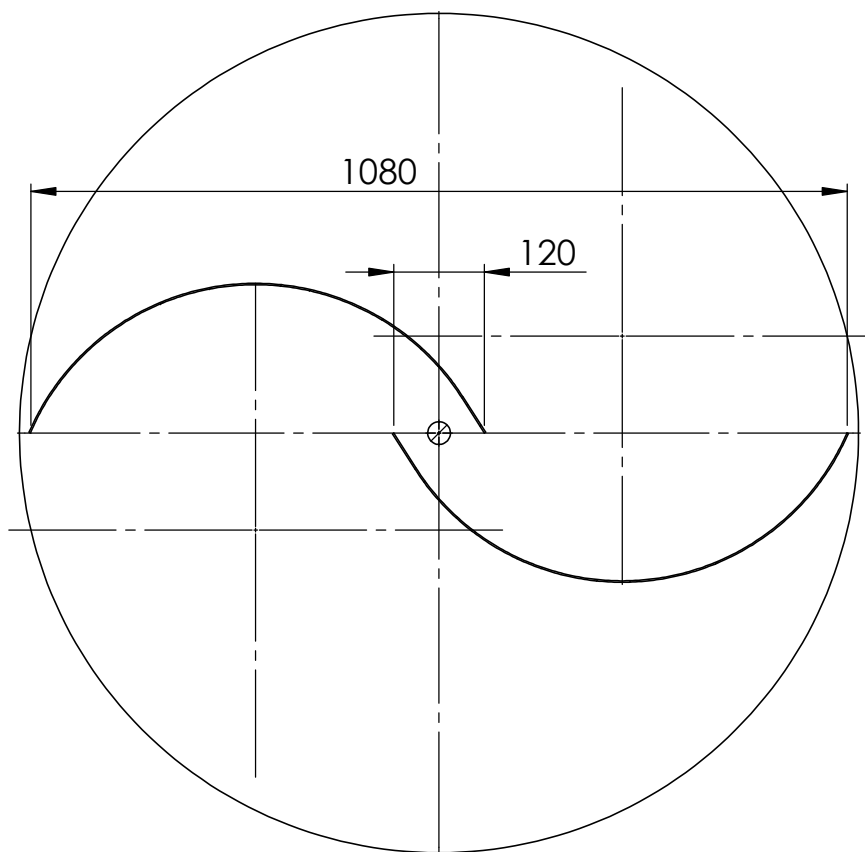
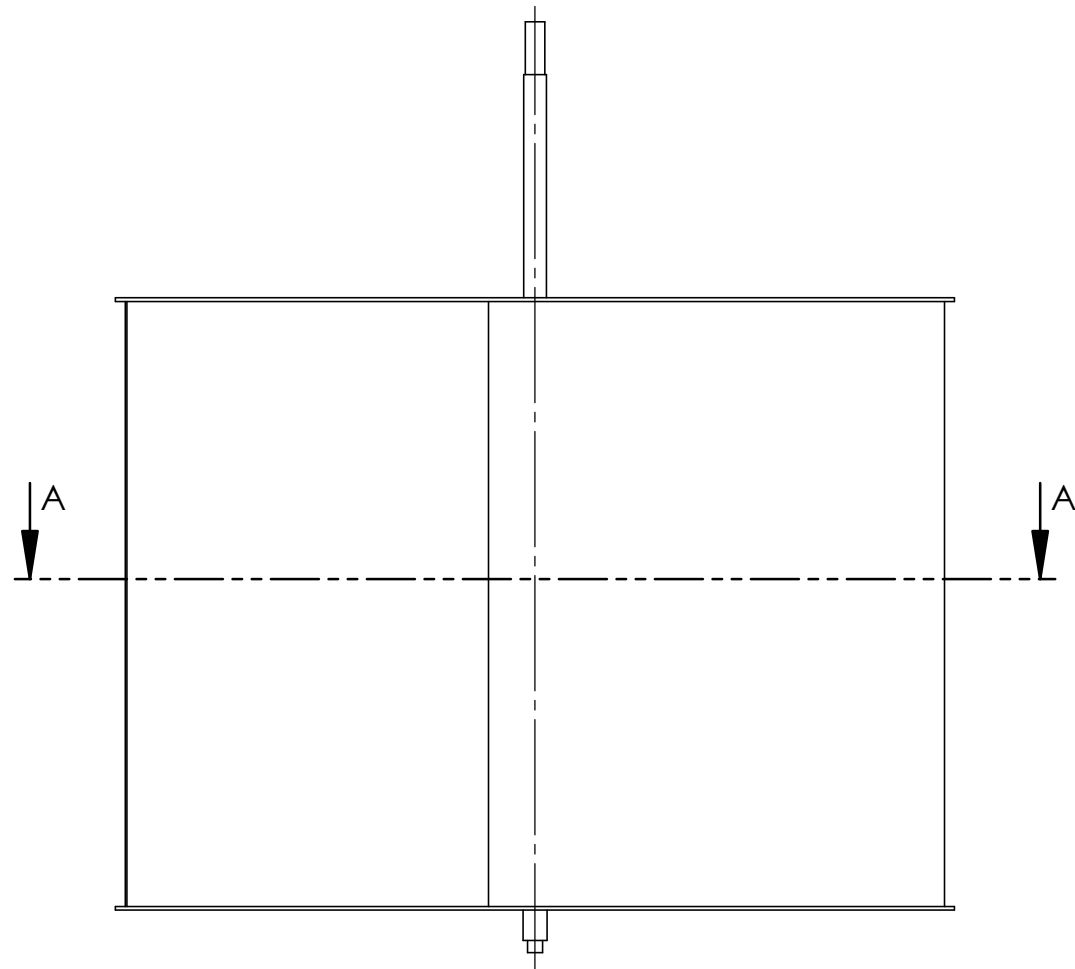
al eje de giro (está sombreado en rojo), con un desplazamiento máximo de 0,334 mm. Siendo casi insignificante este desplazamiento.

En cuanto al ensayo Von-Mises (**Figura Anexo I.3**) la turbina va a soportar las fuerzas sin problemas. Esto se puede apreciar ya que la turbina está de color azul, es decir soportará $5,03 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ y el límite elástico es de $2,068 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

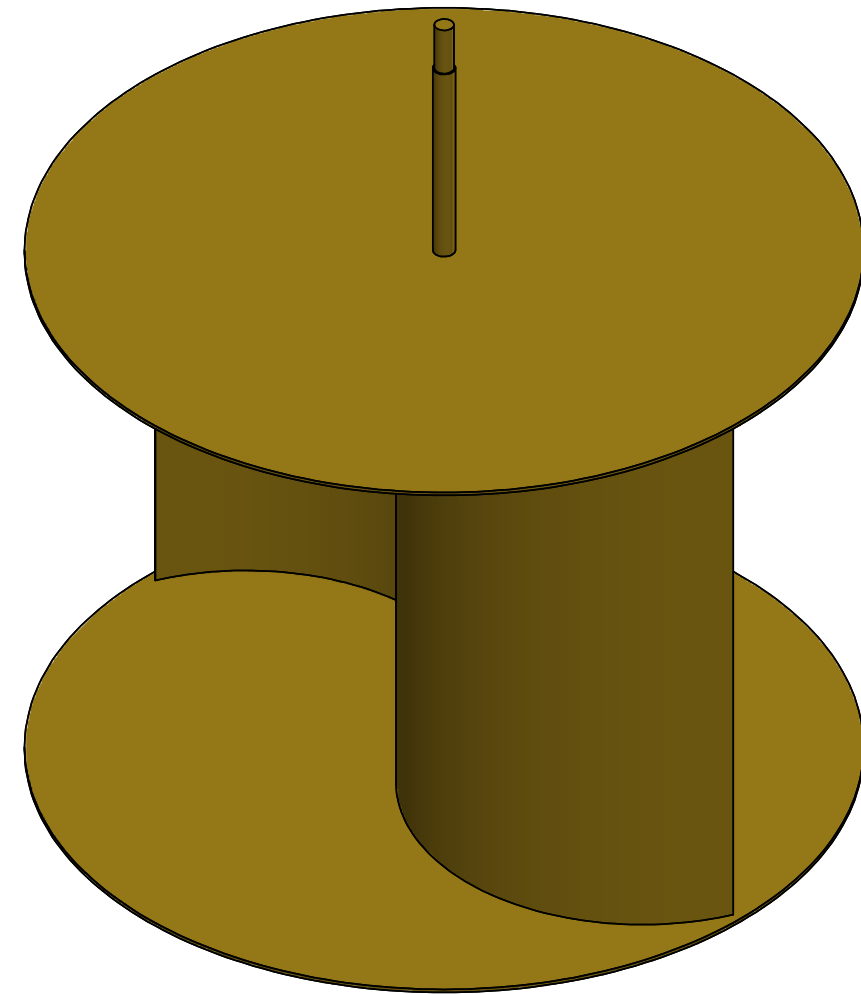


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	Plano	CANTIDAD
1	Estructura	01.001.001	1
2	Turbina	01.001.000	1
3	Porta-rodamientos		2
4	Soporte poleadoble	01.002.000	1
5	Volante inercia	01.001.004	1
6	Correa		2

MATERIAL MATERIAL		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECTION	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)				
		DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APPROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m						
NOMBRE NAME		I.Zubialde							REVISIÓN REVISION		
FECHA DATE		19/02/16									
ESCALAS SCALE		DENOMINACION Conjunto turbina tipo Savonius						PLANO Nº / DRAWING Nº			
1:5		PROYECTO Turbina hidrocinetica tipo Savonius						FORMATO/ FORMAT		PROY MET	
UNIDADES UNITS mm								A3			

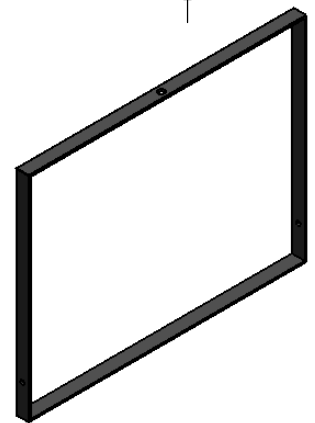
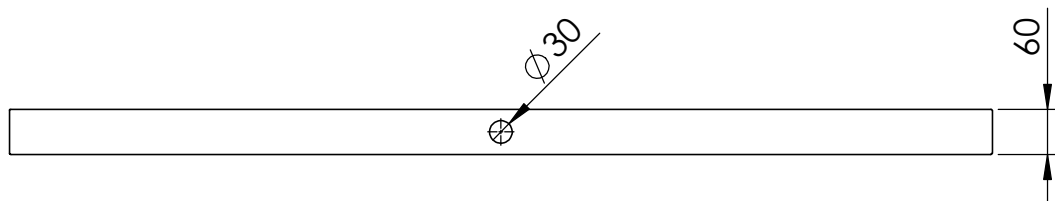
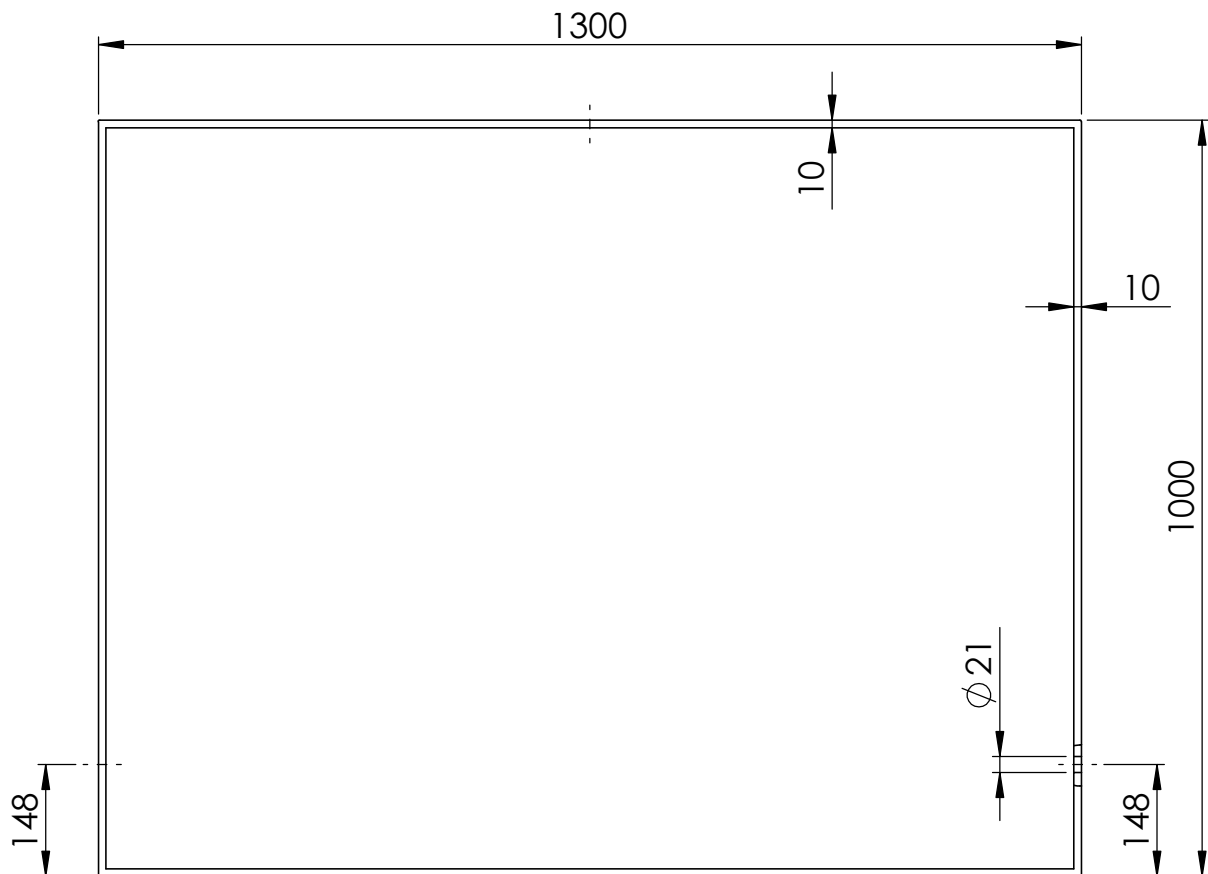


SECCIÓN A-A



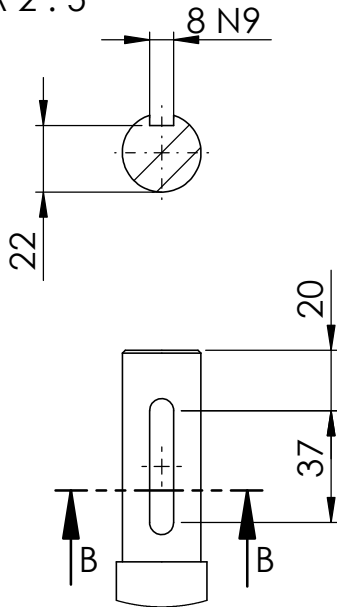
Nota: tanto la palas como el eje de la turbina van unidas mediante soldadura a dos chapas circulares (una en la parte superior y otra en la inferior).

MATERIAL MATERIAL		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PROTECCIÓN PROTECTION		PINTURA PAINTING		PESO WEIGHT (kg)					
		DIBUJADO DRAWN				APROBADO APPROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m							
NOMBRE NAME		I.Zubialde													
FECHA DATE		18/02/16													REVISIÓN REVISION
ESCALAS SCALE		DENOMINACION										PLANO Nº / DRAWING Nº			
1:10		Montaje del rotor										01.001.00			
UNIDADES UNITS mm		PROYECTO										FORMATO/ FORMAT		PROY MET	
		Turbina hidrocínética tipo Savonius										A3			
														MET PROJ	

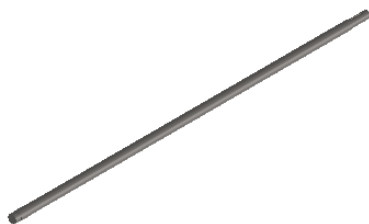
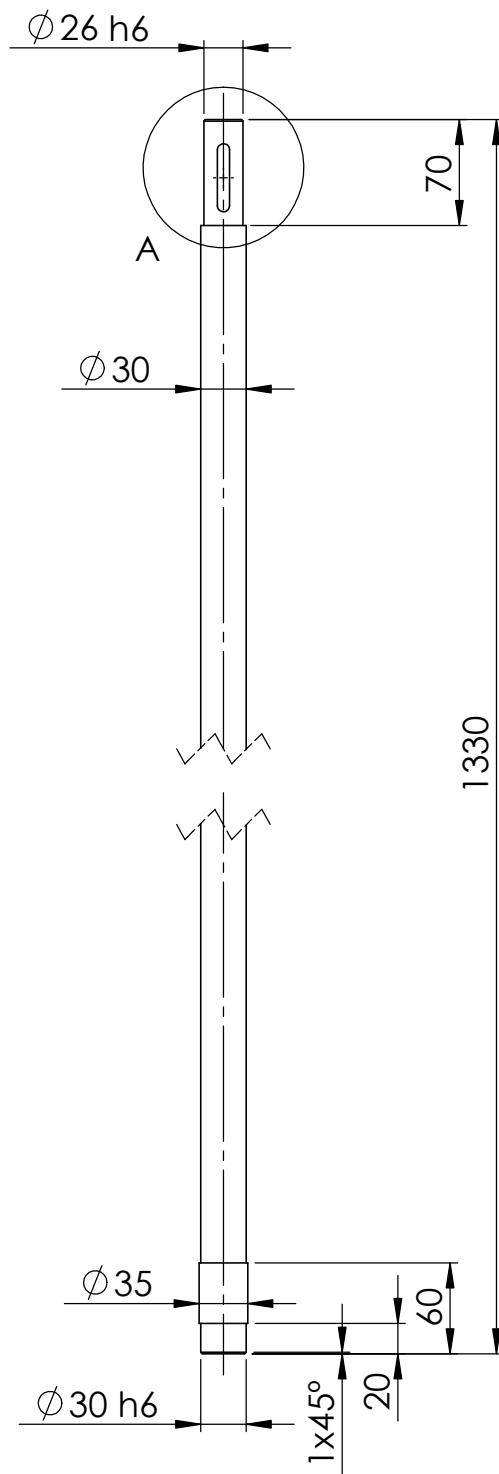


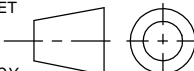
A 01							
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE		REALIZADO/ CREATED		CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION	
MATERIAL AISI 304		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PESO WEIGHT (kg)	
DIBUJADO DRAWN		COMPROBADO REVISED		APROBADO APPROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m	
NOMBRE NAME		I.Zubialde					
FECHA DATE		18/02/16					
ESCALAS / SCALE 1:10		DENOMINACION Estructura de sujección de la turbina					REVISIÓN / REVISION A 00
							PLANO Nº / DRAWING Nº 01.001.001
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO FORMAT A4	PROY MET MET PROJ

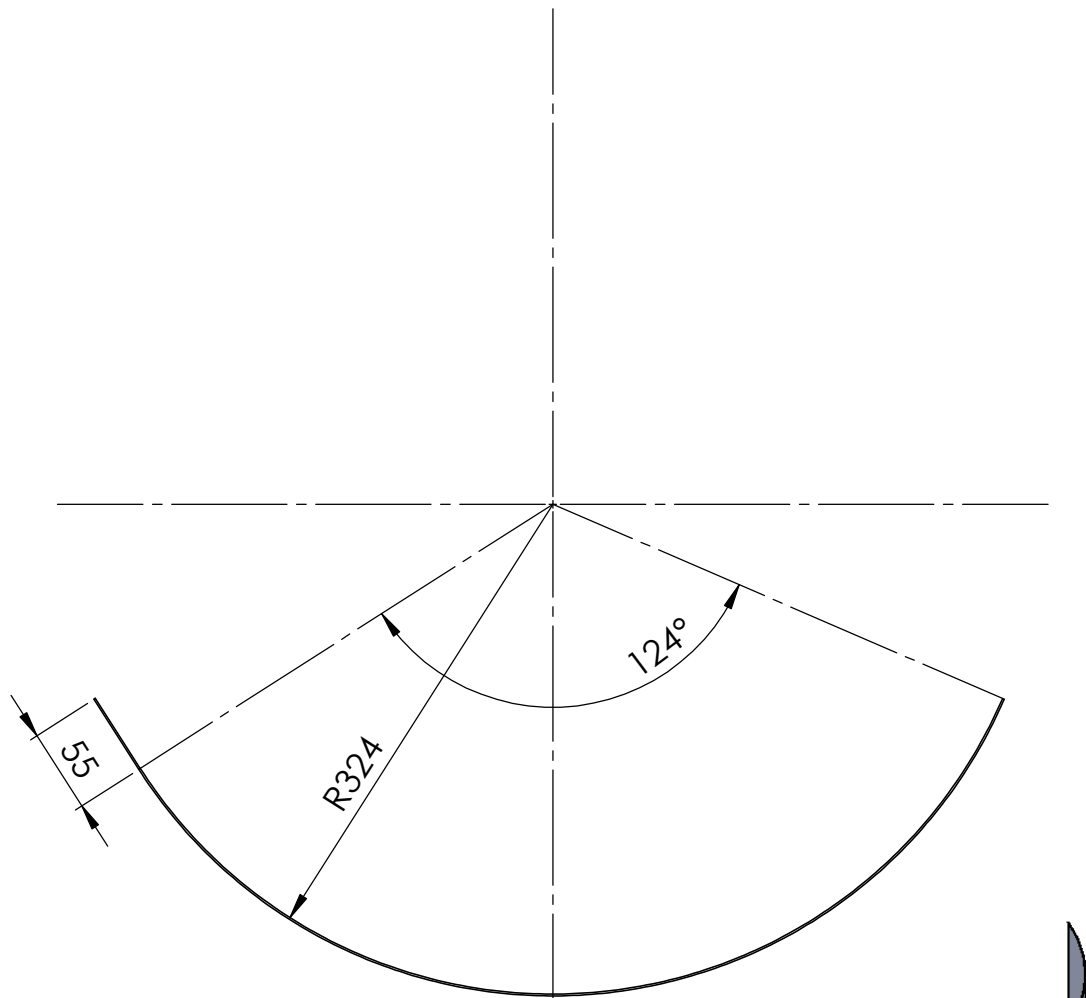
SECCIÓN B-B
ESCALA 2 : 5



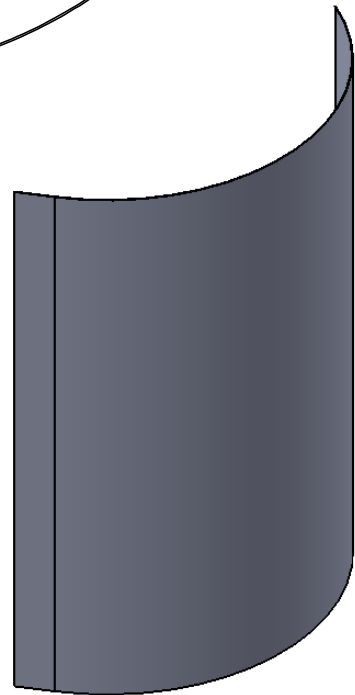
DETALLE A
ESCALA 2 : 5



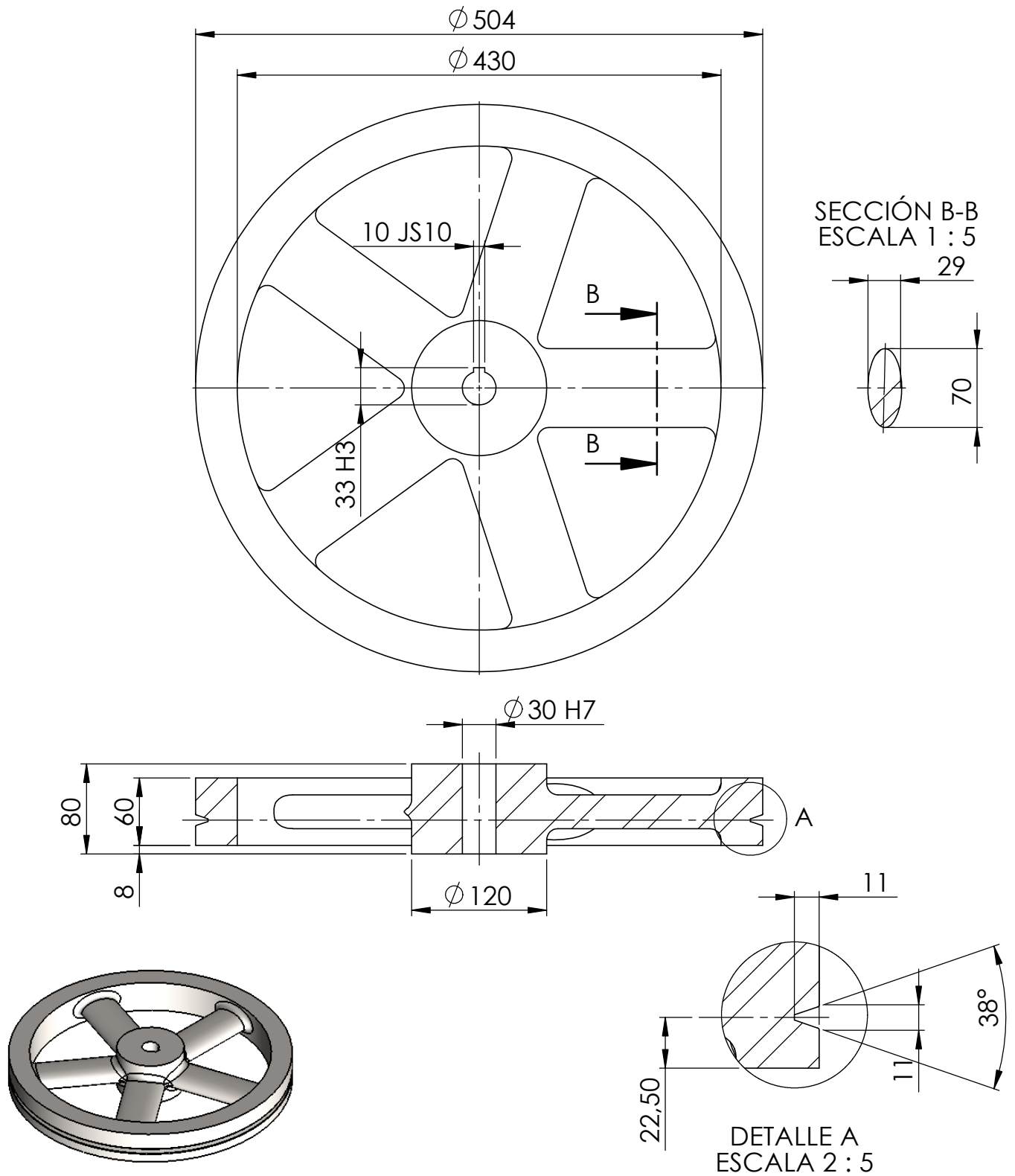
A 01											
REVISIÓN/REW	FECHA / DATE	REALIZADO/ CREATED	CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION								
MATERIAL MATERIAL	TRATAMIENTO TREATMENT	DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECCIÓN	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)						
AISI 304	Acero inoxidable										
	DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES							
NOMBRE NAME	I. Zubialde										
FECHA DATE	18/02/16			UNE EN 22768-1 m		REVISIÓN / REVISION					
ESCALAS / SCALE		DENOMINACION				A 00					
1:5		Eje principal de la turbina				PLANO Nº / DRAWING Nº					
						01.001.002					
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO FORMAT		PROY MET			
						A4		MET PROJ			

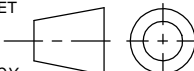


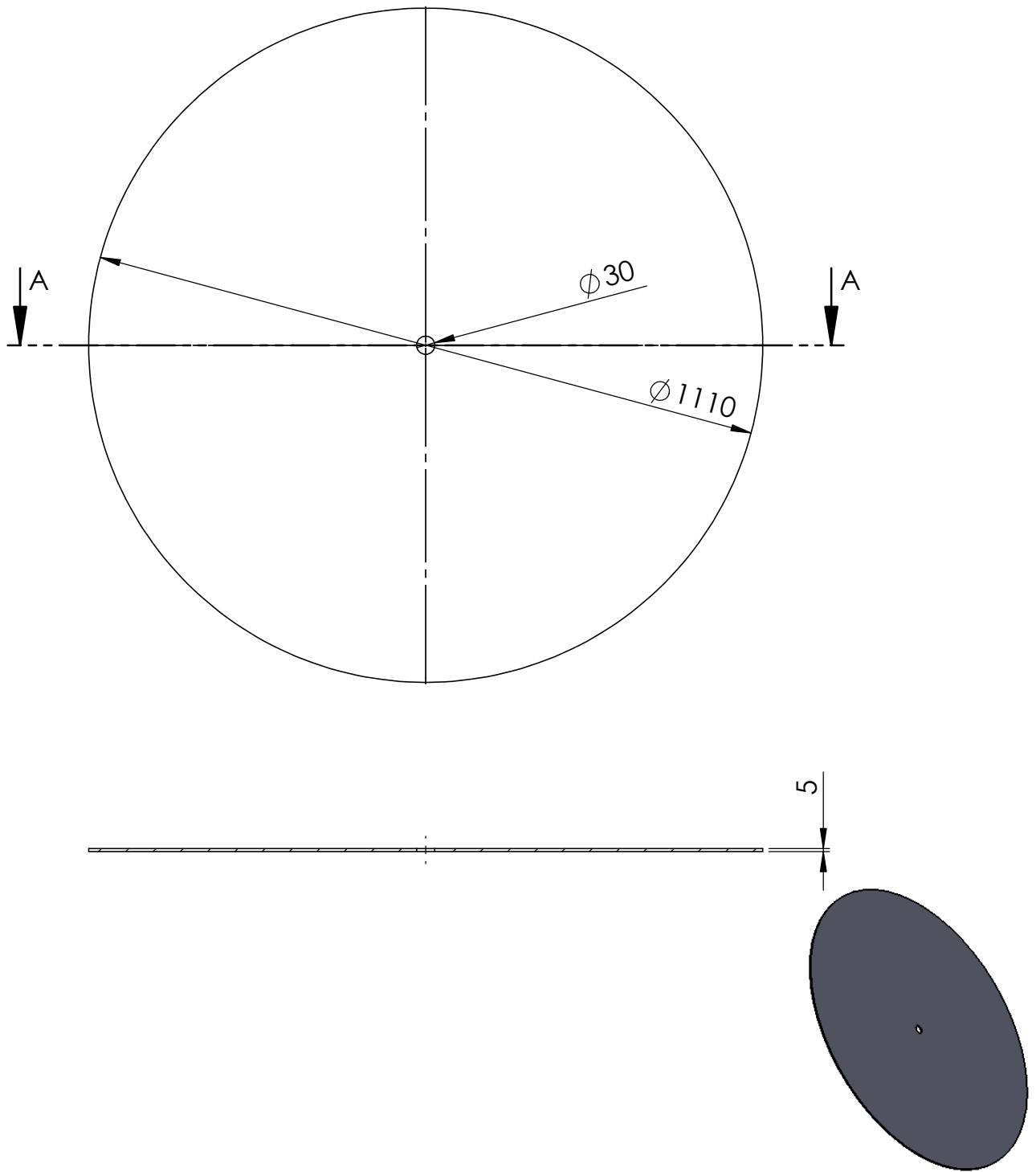
Chapa de espesor e=2mm
 Altura de la chapa 800mm

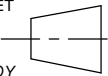



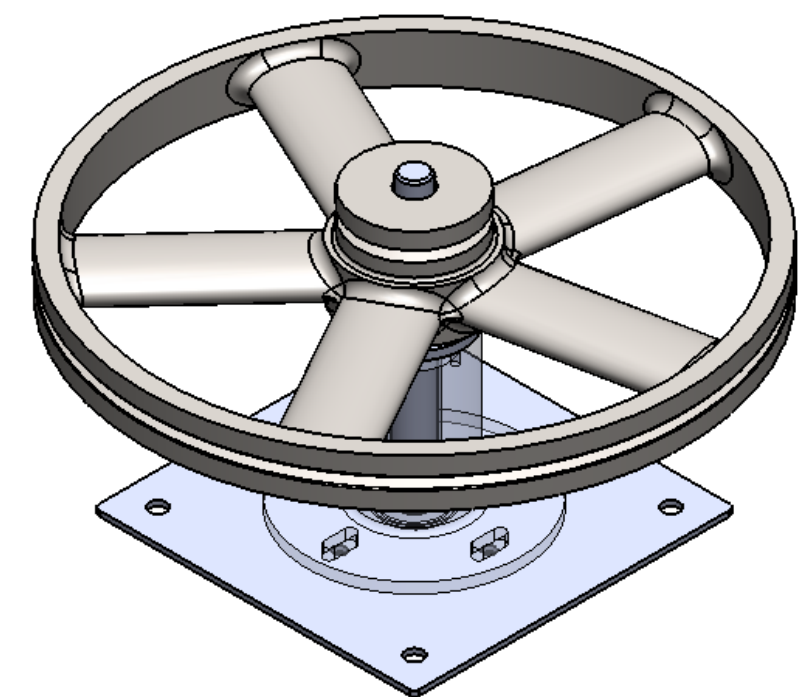
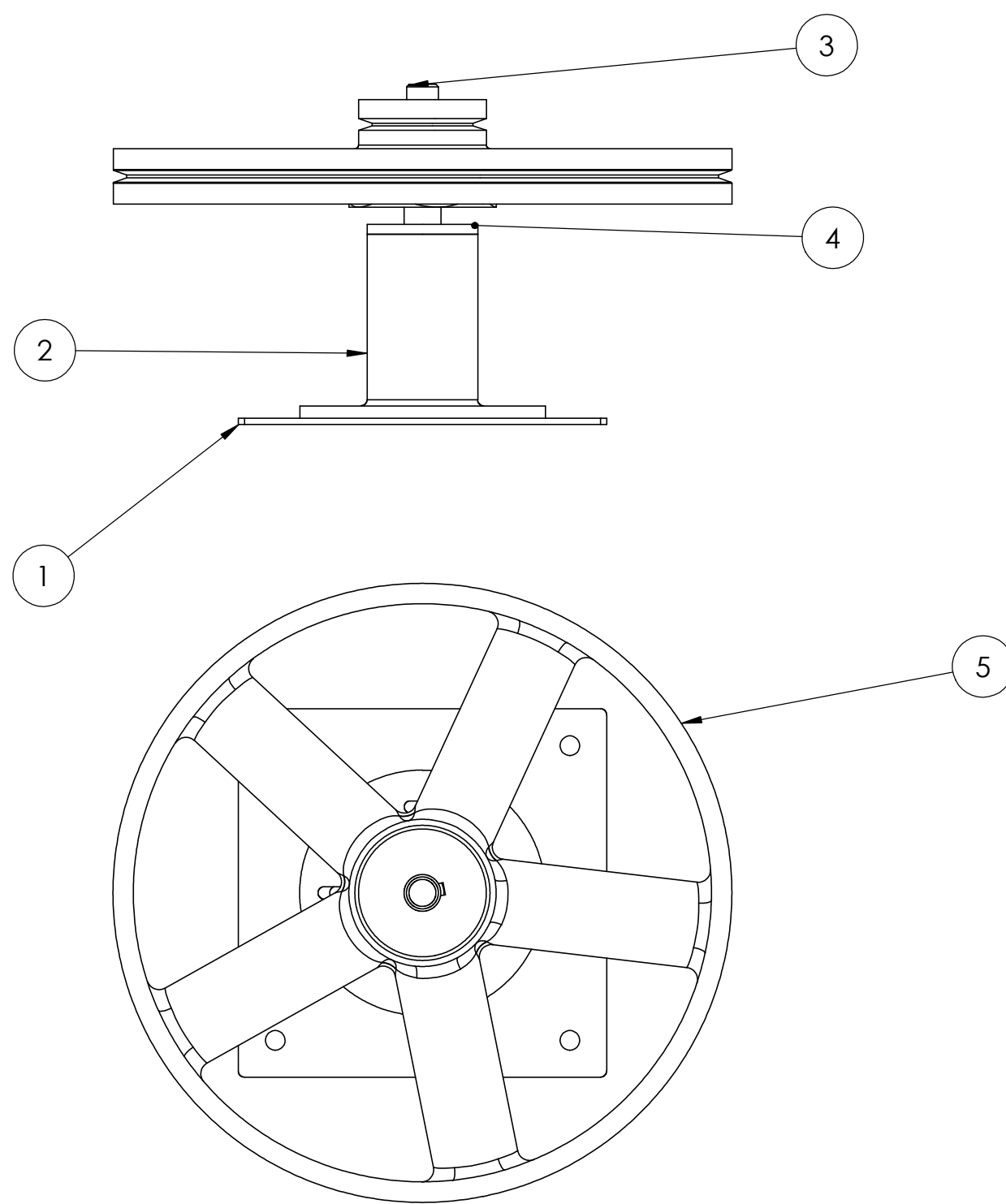
A 01							
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE		REALIZADO/ CREATED		CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION	
MATERIAL AISI 304		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PESO WEIGHT (kg)	
DIBUJADO DRAWN		COMPROBADO REVISED		APROBADO APPROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m	
NOMBRE NAME		I. Zubialde					
FECHA DATE		18/02/16					
ESCALAS / SCALE 1:5		DENOMINACION Pala de la turbina					REVISIÓN / REVISION A 00
							PLANO Nº / DRAWING Nº 01.001.003
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO A4 PROY MET 	
ocinética tipo Savonius							

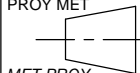



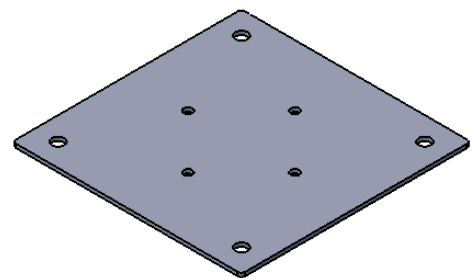
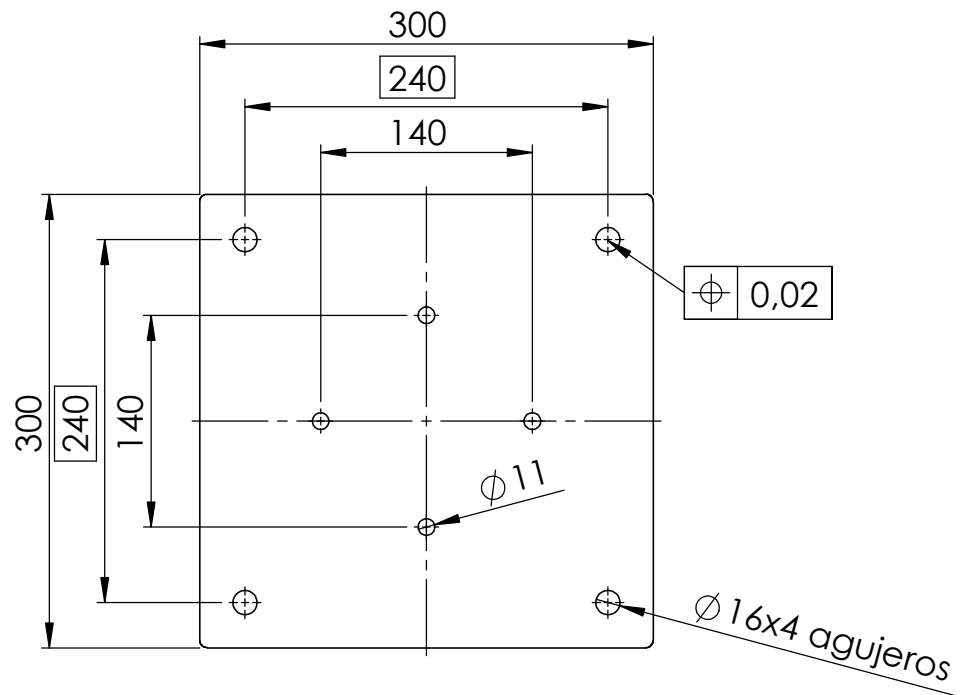
A 01																	
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE		REALIZADO/ CREATED		CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION											
MATERIAL MATERIAL		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PROTECCIÓN PROTECCIÓN		PINTURA PAINTING		PESO WEIGHT (kg)							
Hierro fundido																	
		DIBUJADO DRAWN		COMPROBADO REVISED		APROBADO APROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m									
NOMBRE NAME		I.Zubialde															
FECHA DATE		18/02/15															
ESCALAS / SCALE		DENOMINACION										REVISIÓN / REVISION		A 00			
1:5		Volante de inercia										PLANO Nº / DRAWING Nº		01.001.004			
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico												FORMATO FORMAT		PROY MET			
												A4		MET PROJ			



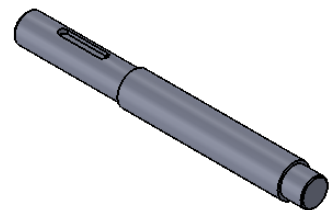
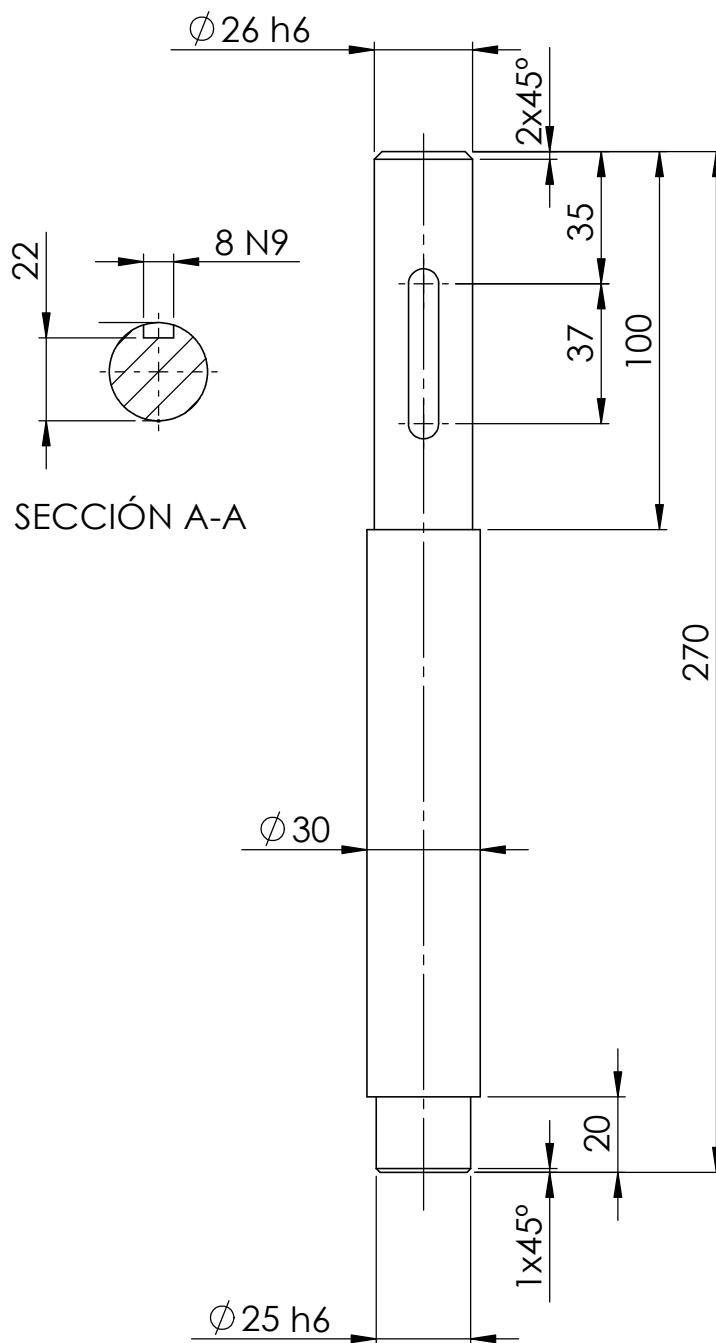
A 01							
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE		REALIZADO/ CREATED		CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION	
MATERIAL AISI 304		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PESO WEIGHT (kg)	
DIBUJADO DRAWN		COMPROBADO REVISED		APROBADO APPROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m	
NOMBRE NAME		I.Zubialde					
FECHA DATE		18/02/16					
ESCALAS / SCALE 1:10		DENOMINACION Tapa de la turbina					REVISIÓN / REVISION A 00
							PLANO Nº / DRAWING Nº 01.001.005
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO A4 PROY MET  	

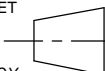



N.º DE ELEMENTO		N.º DE PIEZA		DESCRIPCIÓN		CANTIDAD
1		Placa base				1
2		soporte polea doble				1
3		Eje polea doble				1
4		Tapa				1
5		Polea doble				1
MATERIAL MATERIAL	TRATAMIENTO TREATMENT	DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECTION	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)	
	DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APPROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m		
NOMBRE NAME	I.Zubialde					
FECHA DATE	18/02/16					
	REVISIÓN REVISION					A 00
ESCALAS SCALE	DENOMINACION Conjunto de soporte polea doble					PLANO Nº / DRAWING Nº 01.002.000
1:5						
UNIDADES UNITS mm	NAME Turbina hidrocínética tipo Savonius					FORMATO/ FORMAT A3
						PROY MET  MET PROJ
						

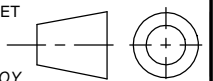


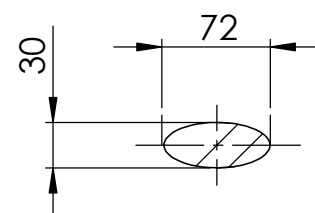
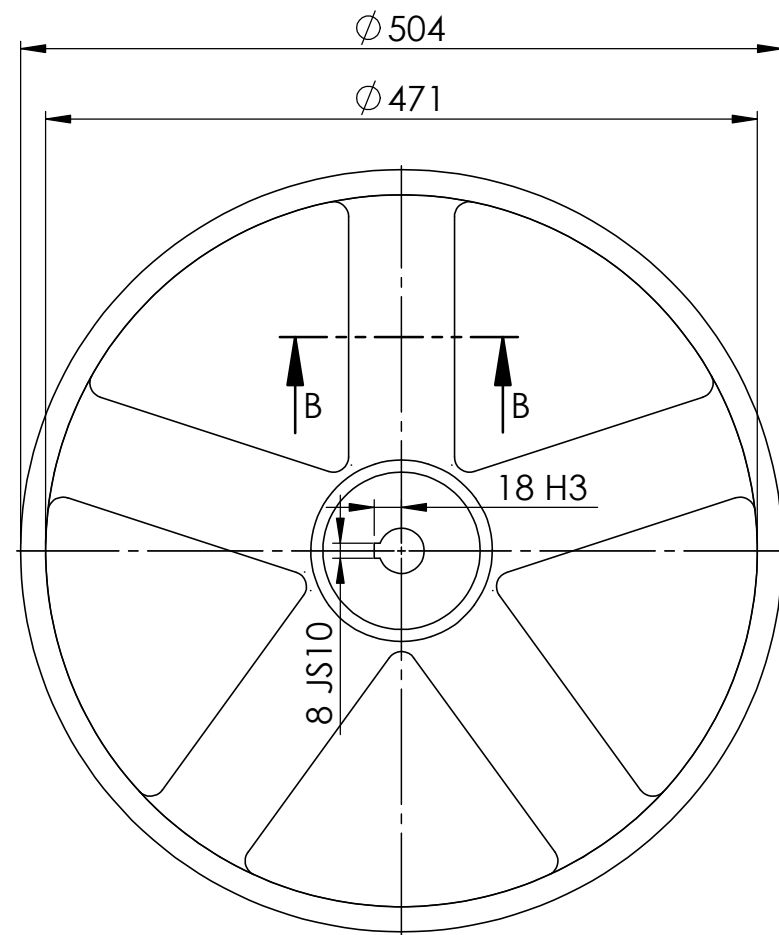
A 01					
REVISIÓN/REW	FECHA / DATE	REALIZADO/ CREATED	CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION		
MATERIAL MATERIAL	TRATAMIENTO TREATMENT	DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECCIÓN	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)
Acero al carbono					
	DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m	
NOMBRE NAME	I.Zubialde				
FECHA DATE	18/02/16				
ESCALAS / SCALE 1:5		DENOMINACION Placa base			REVISIÓN / REVISION A 00
					PLANO Nº / DRAWING Nº 01.002.001
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico					FORMATO FORMAT A4
Mecanica tipo Savonius					PROY MET MET PROJ



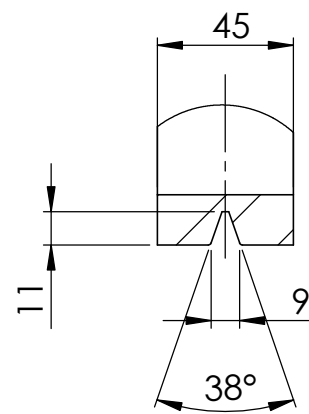
A 01							
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE	REALIZADO/ CREATED	CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION			
MATERIAL MATERIAL		TRATAMIENTO TREATMENT Acero al carbono	DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECTION	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)	
	DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APPROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m			
NOMBRE NAME	I. Zubialde						
FECHA DATE	18/02/16						
ESCALAS / SCALE 1:2		DENOMINACION Eje de polea doble					REVISIÓN / REVISION A 00
							PLANO Nº / DRAWING Nº 01.002.003
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO FORMAT A4	
ocinetica tipo Savonius						PROY MET  MET PROJ 	

ocinética tipo Savonius

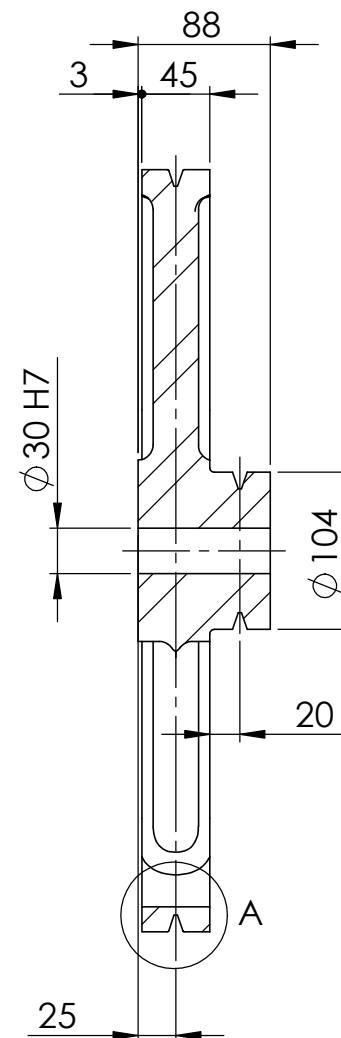


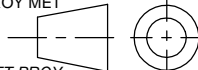


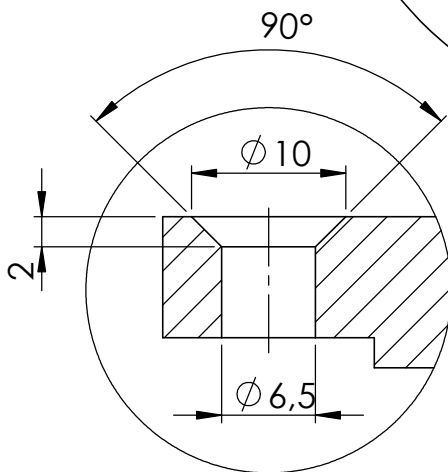
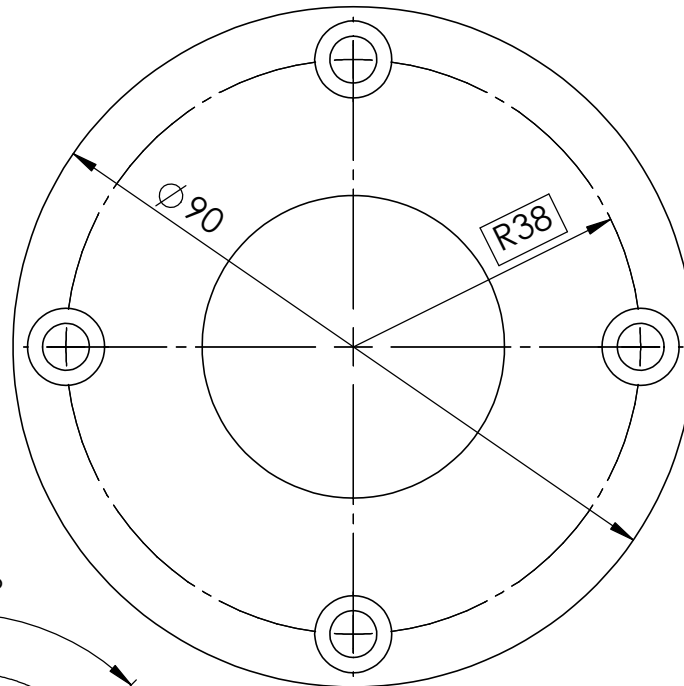
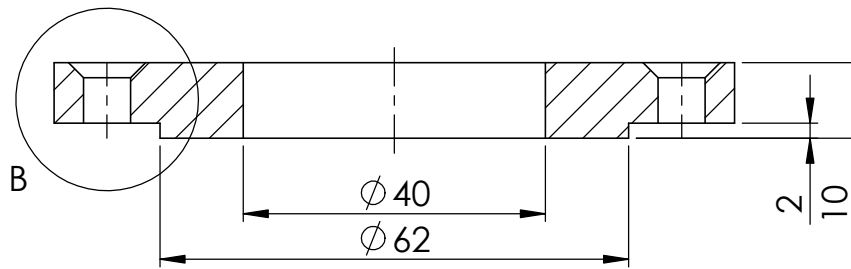
SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 5



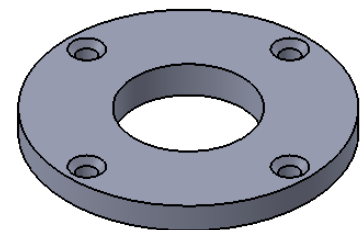
DETALLE A
ESCALA 2 : 5



MATERIAL MATERIAL		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS	PROTECCIÓN PROTECTION	PINTURA PAINTING	PESO WEIGHT (kg)			
Hierro fundido										
	DIBUJADO DRAWN	COMPROBADO REVISED	APROBADO APPROVED	TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m						
NOMBRE NAME	I.Zubialde									
FECHA DATE	18/02/16						REVISIÓN REVISION		A 00	
ESCALAS SCALE		DENOMINACION						PLANO Nº / DRAWING Nº		
1:5		Polea doble						01.002.004		
UNIDADES UNITS mm		PROYECTO						FORMATO/ FORMAT	PROY MET	
		Turbina hidrocínética tipo Savonius						A3	MET PROJ	



DETALLE B
ESCALA 2 : 1



A 01							
REVISIÓN/REW		FECHA / DATE		REALIZADO/ CREATED		CLASE DE MODIFICACION / TYPE OF MODIFICATION	
MATERIAL AISI 1023		TRATAMIENTO TREATMENT		DUREZA HARDNESS		PESO WEIGHT (kg)	
DIBUJADO DRAWN		COMPROBADO REVISED		APROBADO APPROVED		TOLERANCIAS GENERALES / GENERAL TOLERANCES UNE EN 22768-1 m	
NOMBRE NAME		I. Zubialde					
FECHA DATE		17/02/16					
ESCALAS / SCALE 1:1		DENOMINACION Tapa					REVISIÓN / REVISION A 00
							PLANO Nº / DRAWING Nº 01.002.005
Licencia educacional de SolidWorks Sólo para uso académico						FORMATO FORMAT A4	PROY MET MET PROJ